

PHƯƠNG PHÁP TÍNH TOÁN ỨNG SUẤT TƯƠNG ĐƯƠNG PHẦN TỬ HỮU HẠN ĐẬP VÒM BÊ TÔNG

TS. Vũ Hoàng Hưng

Bộ môn Kết cấu công trình, Đại học Thủy lợi

Tóm tắt

Trong tính toán ứng suất phần tử hữu hạn đập vòm thường xuất hiện hiện tượng tập trung ứng suất tại vị trí góc và chân đập. Nếu lấy ứng suất lớn nhất tại các vị trí này làm tiêu chuẩn thiết kế hiển nhiên là không hợp lý. Một trong những phương pháp được sử dụng hiện nay trong tính toán ứng suất đập vòm là phương pháp ứng suất tương đương phần tử hữu hạn. Đối với các phần mềm phần tử hữu hạn thông thường đều chưa có mô đun tính toán ứng suất tương đương. Trong bài báo này tác giả giới thiệu phương pháp tính toán và ứng dụng ngôn ngữ thiết kế tham số hóa APDL trong phần mềm ANSYS để đưa ra kết quả ứng suất tương đương làm tiêu chuẩn thiết kế đập vòm.

1. Đặt vấn đề

Phương pháp dùng để phân tích ứng suất khối đập đập vòm chủ yếu có phương pháp nhiều dầm vòm, phương pháp phần tử hữu hạn và phương pháp thí nghiệm mô hình kết cấu. Hiện nay phương pháp phần tử hữu hạn được ứng dụng rộng rãi trong phân tích ứng suất đập vòm do phương pháp này có nhiều ưu điểm, đặc biệt là trong các trường hợp: đập vòm có hình dạng phức tạp; đập vòm có mở lỗ đáy, lỗ giữa, lỗ mặt hoặc hành lang; phân tích động lực đập vòm, đặc biệt là khi cần xét đến tương tác giữa kho nước và đập; hoặc khi cần xem xét tính phi tuyến tầng nền xen kẽ mềm yếu, tầng đứt gãy, kẽ nứt, rạn nứt hoặc phân tách các khối đập... Dưới giả thiết đàn hồi, loại hình phần tử được sử dụng và kích thước mạng lưới phần tử có liên quan đến kết quả ứng suất phần tử hữu hạn, đặc biệt là đối với vùng phụ cận mặt nền đập tồn tại hiện tượng tập trung ứng suất làm cho tính ổn định giá trị kết quả ứng suất phần tử hữu hạn khá kém, khó thiết lập tiêu chuẩn khống chế ứng suất tương ứng. Trên thực tế đập vòm là một loại kết cấu siêu tĩnh định bậc cao, có khả năng chịu tải rất lớn, nếu lấy ứng suất lớn nhất làm tiêu chuẩn thiết kế, tiến hành thiết kế dựa vào tiêu chuẩn truyền thống mất hiệu lực tính đàn hồi là không hợp lý; nhưng nếu không xét đến tập trung ứng suất, chỉ dựa vào ứng suất thu được của phương pháp dầm vòm tiến hành thiết kế, khả năng lại không đủ an toàn, đặc biệt là đối với đập vòm cao. Năm 1991, giáo sư FU Zuo-xin^[1] đã đề xuất phương

pháp ứng suất tương đương phần tử hữu hạn (Finite Element Equivalent Stress Method): trong phương pháp nhiều dầm vòm, thông thường giả thiết ứng suất chính dầm và vòm xuôi theo độ dày đều là biến đổi tuyến tính (khi không tính ảnh hưởng của tỉ suất độ cong). Kết quả tính toán phương pháp nhiều dầm vòm với kết quả phương pháp phần tử hữu hạn, thí nghiệm mô hình kết cấu cho thấy, ở nơi cách khá xa mặt nền đập, ứng suất đập vòm thu được đều khá giống nhau, ở vùng phụ cận mặt nền đập, phương pháp nhiều dầm vòm với hai loại phương pháp sau chênh lệch khá lớn. Thông thường cho rằng, chênh lệch này chủ yếu có quan hệ với đột biến hình dạng hình học nơi tiếp giáp đập với nền, thuộc về một loại hiện tượng tập trung ứng suất cục bộ, mà tổng ứng suất theo phương độ dày đập (nội lực) là gần như nhau. Nếu lấy tổng ứng suất thu được ở phương pháp phần tử hữu hạn xem là nội lực mặt cắt, sau đó tuyến tính hóa ứng suất trên mặt cắt tương ứng, ứng suất thu được gọi là ứng suất tương đương, ứng suất tương đương này sẽ loại bỏ ảnh hưởng của ứng suất tập trung. Phương pháp này đến nay đã có nhiều tác giả [2,3,4,5] nghiên cứu sâu và cải tiến phương pháp để nâng cao hiệu quả tính toán. Trong Quy phạm thiết kế đập vòm bê tông SL 282-2003 hiện hành của Trung Quốc^[6] cũng quy định khi sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn cần bổ sung tính toán “*ứng suất tương đương phần tử hữu hạn*” và quy định rõ chỉ tiêu khống chế ứng suất tương ứng. Hiện nay các phần mềm phần tử hữu hạn thông dụng như ANSYS, SAP2000, ABAQUS, ADINA... dùng để phân tích ứng suất đập vòm đều chưa có mô đun tính toán ứng suất tương đương phần tử hữu hạn, vì vậy tác giả lợi dụng ngôn ngữ thiết kế tham số hóa APDL trong phần mềm ANSYS xuất kết quả ứng suất tương đương phần tử hữu hạn trong phân tích đập vòm bê tông.

2. Nguyên lý tính toán ứng suất tương đương

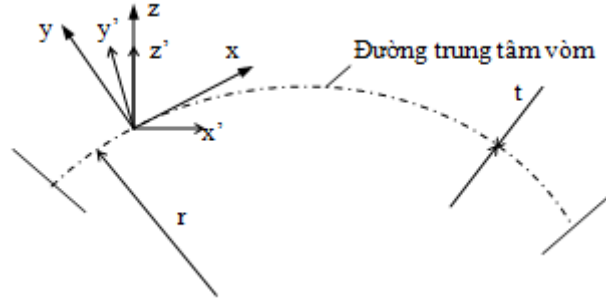
Nguyên lý tính toán ứng suất tương đương là dựa vào kết quả tính toán các thành phần ứng suất trong phương pháp phần tử hữu hạn, tích phân dọc theo mặt cắt dầm và vòm thu được nội lực (lực dọc và mô men), sau đó dùng phương pháp sức bền vật liệu tính toán lại các thành phần ứng suất trên mặt cắt ngang, sau khi thực hiện thao tác này đã loại bỏ ứng suất tập trung, đem lại hiệu quả cao hơn phương pháp cơ học kết cấu thông thường.

Ứng suất thu được trong tính toán đập vòm khi dùng phương pháp phần tử hữu hạn được đặt trong hệ tọa độ tổng thể (x', y', z') , để tính toán ứng suất tương đương cần chuyển sang hệ tọa độ cục bộ (x, y, z) đặt tại điểm i nằm trên đường trung tâm vòm ngang như hình vẽ 1, trong đó trục x nằm ngang theo phương tiếp tuyến với đường trung tâm vòm, trục y nằm ngang theo phương hướng kính, trục z hướng thẳng đứng lên trên, quan hệ giữa hệ tọa độ cục bộ (x, y, z) và hệ tọa độ tổng thể (x', y', z') được cho ở công thức (1) dưới đây:

$$\begin{cases} x \\ y \\ z \end{cases} = \begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{bmatrix} \begin{cases} x' \\ y' \\ z' \end{cases} \quad (1)$$

trong công thức (1): l_i, m_i, n_i là cô sin dẫn hướng của x, y và z, z' đồng trục; góc tạo bởi x' và x là α (ngược kim đồng hồ là dương):

$$l_1 = \cos \alpha, m_1 = \sin \alpha, n_1 = 0; l_2 = -\sin \alpha, m_2 = \cos \alpha, n_2 = 0; l_3 = 0, m_3 = 0, n_3 = 1$$



Hình 1: Chuyển đổi hệ tọa độ

Ứng suất trong hệ tọa độ tổng thể là $\{\sigma'\} = [\sigma_{x'} \quad \sigma_{y'} \quad \sigma_{z'} \quad \tau_{x'y'} \quad \tau_{y'z'} \quad \tau_{z'x'}]^T$, ứng suất trong hệ tọa độ cục bộ là $\{\sigma\} = [\sigma_x \quad \sigma_y \quad \sigma_z \quad \tau_{xy} \quad \tau_{yz} \quad \tau_{zx}]^T$ được tính theo công thức (2):

$$\{\sigma\} = [T_\sigma] \{\sigma'\} \quad (2)$$

trong đó:

$$[T_\sigma] = \begin{bmatrix} l_1^2 & m_1^2 & n_1^2 & 2l_1m_1 & 2m_1n_1 & 2l_1n_1 \\ l_2^2 & m_2^2 & n_2^2 & 2l_2m_2 & 2m_2n_2 & 2l_2n_2 \\ l_3^2 & m_3^2 & n_3^2 & 2l_3m_3 & 2m_3n_3 & 2l_3n_3 \\ l_1l_2 & m_1m_2 & n_1n_2 & l_1m_2 + l_2m_1 & m_1n_2 + m_2n_1 & l_1n_2 + l_2n_1 \\ l_2l_3 & m_2m_3 & n_2n_3 & l_2m_3 + l_3m_2 & m_2n_3 + m_3n_2 & l_2n_3 + l_3n_2 \\ l_1l_3 & m_1m_3 & n_1n_3 & l_1m_3 + l_3m_1 & m_1n_3 + m_3n_1 & l_1n_3 + l_3n_1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

hoặc cũng có thể viết theo hình thức dưới đây:

$$\begin{cases} \sigma_x = \sigma_{x'} \cos^2 \alpha + \sigma_{y'} \sin^2 \alpha + \tau_{x'y'} \sin 2\alpha \\ \sigma_y = \sigma_{x'} \sin^2 \alpha + \sigma_{y'} \cos^2 \alpha - \tau_{x'y'} \sin 2\alpha \\ \sigma_z = \sigma_{z'} \\ \tau_{xy} = (\sigma_{y'} - \sigma_{x'}) \sin \alpha \cos \alpha + \tau_{x'y'} (\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) \\ \tau_{yz} = \tau_{y'z'} \cos \alpha - \tau_{z'x'} \sin \alpha \\ \tau_{zx} = \tau_{y'z'} \sin \alpha + \tau_{z'x'} \cos \alpha \end{cases} \quad (4)$$

Trên đường trung tâm vòm lấy độ rộng đơn vị mặt cắt ngang dầm, độ rộng của điểm y là $1+y/r$, r là bán kính đường trung tâm vòm, dọc theo phương độ dày vòm tiến hành tích phân đối với ứng suất của dầm thu được nội lực của dầm như các công thức từ (5) đến (9) và các thành phần nội lực có thể xem ở hình 2:

Lực dọc trên mặt cắt ngang dầm:

$$W_b = - \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_z \left(1 + \frac{y}{r}\right) dy \quad (5)$$

Mô men trên mặt cắt ngang dầm:

$$M_b = - \int_{-t/2}^{t/2} (y - y_0) \sigma_z \left(1 + \frac{y}{r}\right) dy \quad (6)$$

Lực cắt theo phương tiếp tuyến trên mặt cắt ngang dầm:

$$Q_b = - \int_{-t/2}^{t/2} \tau_{zx} \left(1 + \frac{y}{r}\right) dy \quad (7)$$

Lực cắt theo phương hướng kính trên mặt cắt ngang dầm:

$$V_b = - \int_{-t/2}^{t/2} \tau_{zy} \left(1 + \frac{y}{r}\right) dy \quad (8)$$

Mô men trên mặt cắt ngang dầm:

$$\overline{M}_b = - \int_{-t/2}^{t/2} (y - y_0) \tau_{zx} \left(1 + \frac{y}{r}\right) dy \quad (9)$$

Trong các công thức, y_0 là tọa độ tâm hình mặt cắt dầm

Độ cao mặt cắt hướng kính vòm lấy là 1 đơn vị, dọc theo phương độ dày tiến hành tích phân đối với ứng suất của vòm thu được nội lực vòm như dưới đây:

Lực đẩy ngang trên mặt cắt vòm:

$$H_a = - \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x dy \quad (10)$$

Mô men trên mặt cắt vòm:

$$M_a = - \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x y dy \quad (11)$$

Lực cắt hướng kính trên mặt cắt vòm:

$$V_a = \int_{-t/2}^{t/2} \tau_{xy} dy \quad (12)$$

Từ nội lực dầm và vòm ở trên, dùng phương pháp sức bền vật liệu tính toán ứng suất trong đập, từ đó loại bỏ ảnh hưởng của ứng suất tập trung. Ứng suất chính tương đương hướng dầm và ứng suất cắt tương đương hướng vòm lần lượt là:

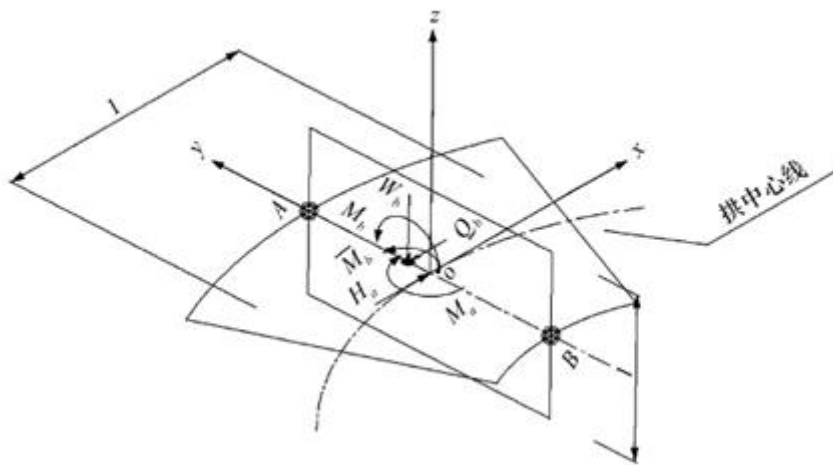
Ứng suất chính tương đương hướng dầm:

$$\sigma_b^{up} = \frac{W_b}{A_b} \pm \frac{M_b}{I_b} \left(\frac{t}{2} \mp y_0 \right) \quad (13)$$

Ứng suất cắt tương đương hướng vòm:

$$\tau_{ba}^{up} = \frac{Q_b}{A_b} \pm \frac{\bar{M}_b}{I_b} \left(\frac{t}{2} \mp y_0 \right) \quad (14)$$

trong công thức, A_b là diện tích mặt cắt ngang dầm; I_b là mô men quán tính trên mặt cắt ngang dầm; t là độ dày; $\left(\frac{t}{2} \mp y_0 \right)$ là khoảng cách từ tâm đến mép thượng hạ lưu.

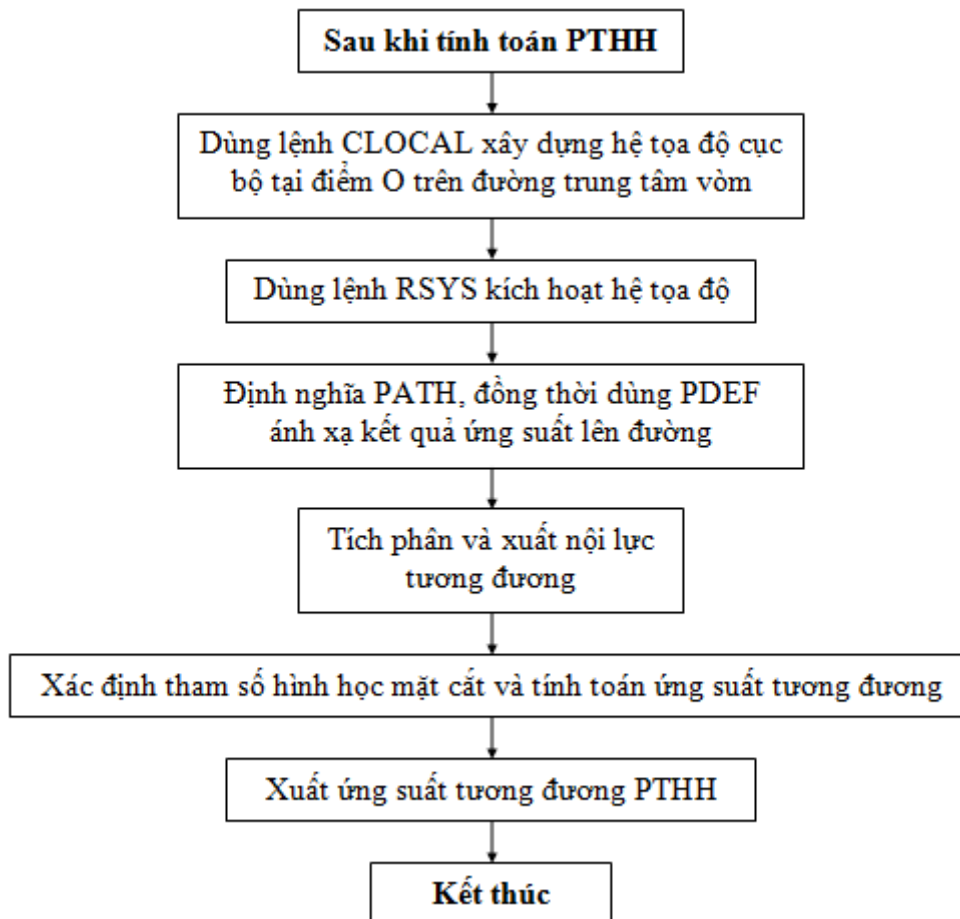


Hình 2: Nội lực mặt cắt ứng suất tương đương

3. Tính toán ứng suất tương đương trong phần mềm ANSYS

Bản thân phần mềm ANSYS không có mô đun tính toán ứng suất tương đương nhưng có thể thông qua ngôn ngữ thiết kế tham số hóa APDL trong phần mềm tính toán ứng suất tương đương phần tử hữu hạn đập vòm. Sau khi tính toán phần tử hữu hạn đập vòm, dùng ngôn ngữ APDL lập trình xuất kết quả ứng suất tương đương, sơ đồ quá trình thực hiện có thể xem hình 3. Đầu tiên dùng lệnh CLOCAL

xây dựng hệ tọa độ cục bộ và dùng lệnh RSYS để kích hoạt hệ tọa độ này; lấy hai điểm A và B làm điểm khống chế dùng lệnh PATH xây dựng đường AB và dùng lệnh PDEF ánh xạ kết quả tính toán các thành phần ứng suất lên đường AB; sau đó tiến hành tích phân thu được nội lực trên mặt cắt; sau khi xuất nội lực dùng công thức (13) và (14) để tiến hành tính toán ứng suất tương đương.



Hình 3: Sơ đồ tính toán ứng suất tương đương

Dưới đây là đoạn câu lệnh tính toán nội lực mặt cắt trong tính toán ứng suất tương đương:

```

NWPLAN,,,,
WPROTA,,
WPROTA,
CSWPLA,,
RSYS,
PATH,,,,
PPATH,1,
PPATH,2,
PDEF,SX,S,X
PDEF,SZ,S,Z
  
```

```

PDEF,SZX,S,XZ
PDEF,SYZ,S,YZ
PDEF,SXY,S,XY
PVECT,RADI,LX,LY,LX
*GET,TR1,PATH,,LAST,S
R1=(2*R0-TR1)/(2*R0+TR1)
AB=TR1
RE=R0+TR1/2
IBB=(RE*TR1**3)*(1+4*R1+R1**2)/36/(1+R1)/R0
LG=TR1*(2*R1+1)/3/(1+R1)
Y0=TR1*(1-R1)/6/(1+R1)
AA2=TR1
IAA=TR1**3/12
CALC,ADD,HH1,LY,,1/R0,,1
PCALC,MULT,SSZ,SZ,HH1,1
PCALC,INTG,WB,SSZ,S,-1
*GET,WB,PATH,,LAST,WB
PCALC,MULT,SSZX,SZX,HH1,1
PCALC,INTG,VB,SSZY,S,-1
*GET,VB,PATH,,LAST,VB
PCALC,ADD,HH2,LY,,,,-Y0
PCALC,MULT,HH3,HH1,HH2,1
PCALC,MULT,SSSZ,SZ,HH3,1
PCALC,INTG,MB,SSSZ,S,-1
*GET,MB,PATH,,LAST,MB
PCALC,MULT,SSZX,SZX,HH3,1
PCALC,INTG,MMB,SSZX,S,-1
*GET,MMB,PATH,,LAST,MMB
PCALC,INTG,HA,SX,S,-1
*GET,HA,PATH,,LAST,HA
PCALC,INTG,VA,SXY,S,1
*GET,VA,PATH,,LAST,VA
PCALC,MULT,SSX,SX,LY
PCALC,INTG,MA,SSX,S,-1
*GET,MA,PATH,,LAST,MA

```

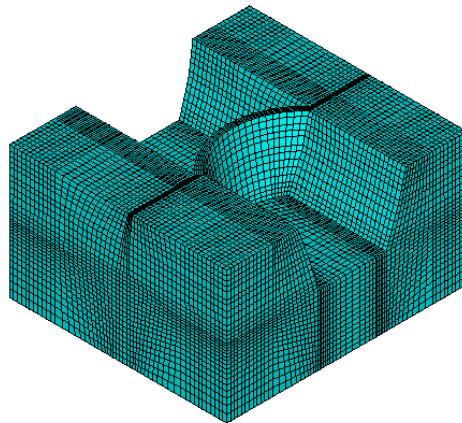
4. Ví dụ tính toán

Lựa chọn mô hình tính toán là một đập vòm đơn giản, đập cao 55 m, bề rộng đỉnh đập 5 m, bề rộng đáy đập 16 m, chiều dài đập tại đỉnh 115 m, tỉ lệ độ dài/cao 2/1. Phạm vi tính toán: nền phía thượng lưu 80 m, nền phía hạ lưu 110 m, nền hai vai 110 m, từ đáy đập hướng xuống dưới 60 m. Sử dụng mô hình nền có khối lượng, biên nền cố định. Để đơn giản hóa tính toán, giả định mực nước thượng lưu bằng cao trình đỉnh đập, đập chỉ chịu tải trọng áp lực nước thượng lưu và trọng lượng bản thân. Tham số cơ học vật liệu cho ở bảng 1. Mô hình phần tử hữu hạn đập và nền

cho ở hình vẽ 4.

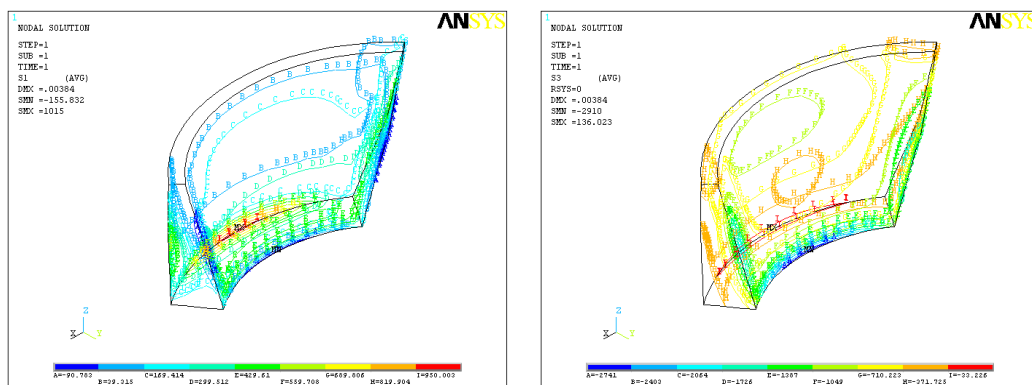
Bảng 1: Tham số cơ học vật liệu

Vật liệu	Lực dính c (Mpa)	Góc ma sát trong φ ($^{\circ}$)	Mô đun đàn hồi E Mpa	Hệ số Poisson ν	Khối lượng riêng ρ (kg/m ³)
Bê tông	-	-	22000	0.167	2300
Nền đá	-	-	22700	0.240	2600



Hình 4: Mô hình phân tử hữu hạn đập và nền

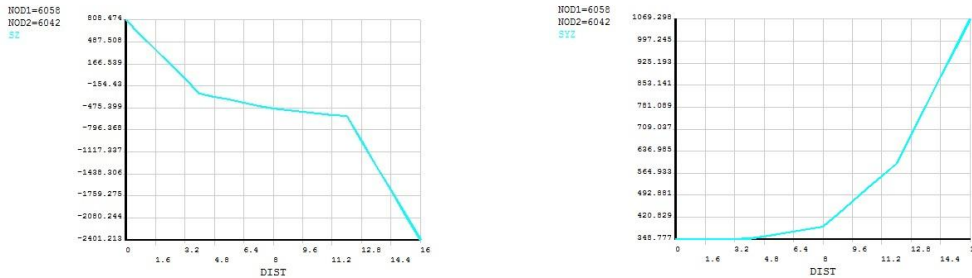
Hình 5 thể hiện đường đẳng giá trị ứng suất chính thứ nhất và ứng suất chính thứ ba trong khối đập. Hình 6 thể hiện phân bố ứng suất SZ và SYZ trên mặt cắt ngang giữa mặt cắt đáy đập. Từ hình vẽ 6 có thể thấy rằng, khi dùng phương pháp phần tử hữu hạn vùng phụ cận mặt đáy đập phía thượng hạ lưu có hiện tượng tập trung ứng suất, để nâng cao độ chính xác tính toán, tiến hành tính toán bổ sung “*ứng suất tương đương phần tử hữu hạn*”.



Hình 5: Đường đẳng giá trị ứng suất tính toán phần tử hữu hạn

Bảng 2: Ứng suất chính trong khối đập

Ứng suất	Ứng suất chính S1	Ứng suất chính S2	Ứng suất chính S3
Giá trị (MPa)	-0.156~1.015	-0.920~0.241	-2.910~0.136

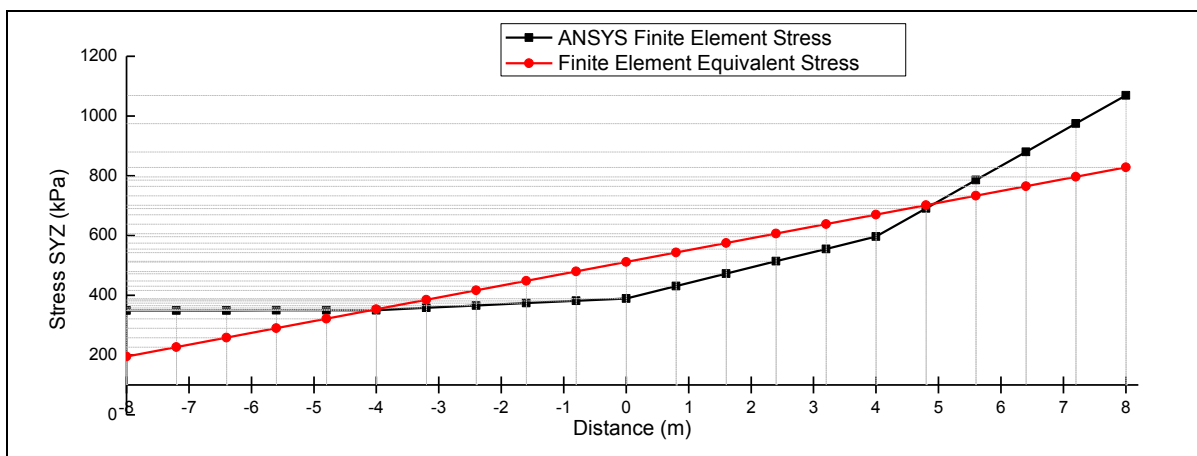
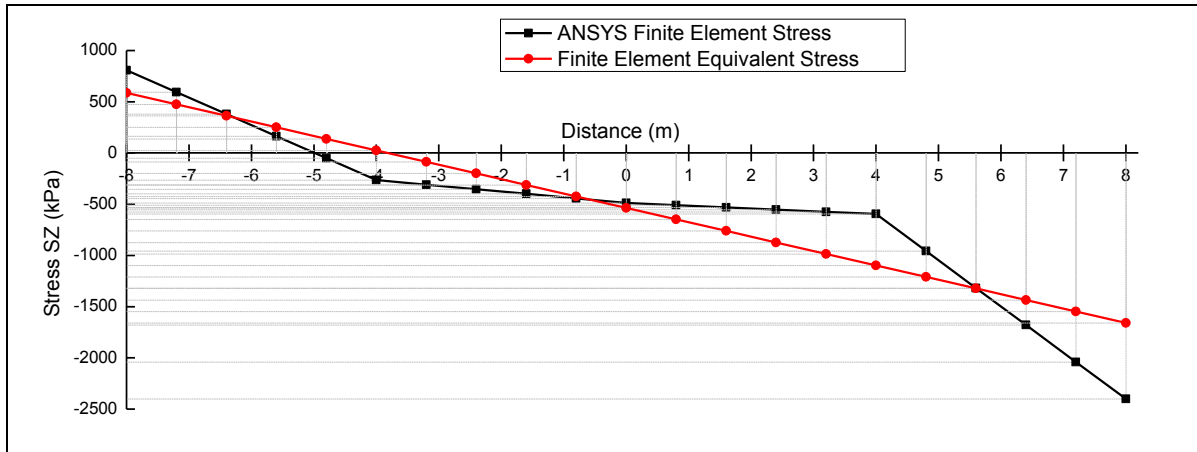


Hình 6: Phân bố ứng suất SZ và SYZ trên mặt cắt giữa mặt đáy đập

Dựa vào kết quả tính toán ứng suất phần tử hữu hạn, tiến hành tính toán bổ sung ứng suất tương đương trong khối đập. Kết quả tính toán ứng suất phần tử hữu hạn và sau khi bổ sung tính toán ứng suất tương đương cho ở hình 7, cụ thể giá trị cho ở bảng 3. Từ hình 7 có thể thấy rằng, kết quả tính toán ứng suất phần tử hữu hạn trong phần mềm ANSYS có hiện tượng đột biến ứng suất, sau khi tính toán ứng suất tương đương, đã loại bỏ được ứng suất tập trung ở hai mép thượng và hạ lưu. Trước khi tính toán ứng suất tương đương, ứng suất tại mặt cắt giữa mặt đáy đập, ứng suất kéo phía thượng lưu là 0.808 MPa, ứng suất nén phía hạ lưu là 2.401 MPa; sau khi tính toán ứng suất tương đương, ứng suất kéo phía thượng lưu giảm xuống còn 0.587 MPa, ứng suất nén phía hạ lưu giảm xuống còn 1.659 MPa. Điều này cho thấy, ứng suất tương đương đã loại bỏ một phần ứng suất tập trung.

Bảng 3: So sánh kết quả tính toán ứng suất phần tử hữu hạn với ứng suất tương đương

Ứng suất		Ứng suất phần tử hữu hạn	Ứng suất tương đương
Ứng suất chính SZ (MPa)	Lớn nhất	0.808	0.587
	Nhỏ nhất	-2.401	-1.659
Ứng suất cắt SYZ (MPa)	Lớn nhất	0.349	0.195
	Nhỏ nhất	1.069	0.828



Hình 7: So sánh kết quả tính toán ứng suất phần tử hữu hạn với ứng suất tương đương

5. Kết luận

Trong tính toán ứng suất đập vòm, tại vị trí đáy đập thượng và hạ lưu thường tồn tại ứng suất tập trung, nếu lấy ứng suất lớn nhất làm tiêu chuẩn thiết kế hiển nhiên là không hợp lý, nhưng nếu không xét đến ứng suất tập trung, chỉ dựa vào ứng suất thu được của phương pháp dầm vòm để tiến hành thiết kế, khả năng lại không đủ an toàn, đặc biệt là đối với đập vòm cao. Việc xác định chỉ tiêu khống chế ứng suất trong tính toán phần tử hữu hạn đã được nhiều tác giả nghiên cứu, một trong những phương pháp được sử dụng hiện nay là phương pháp tính toán ứng suất tương đương phần tử hữu hạn.

Dựa vào ngôn ngữ thiết kế tham số hóa APDL trong phần mềm ANSYS tác giả đã thực hiện tính toán ứng suất tương đương đập vòm. Thông qua một ví dụ tính toán bằng số đã cho kết quả tính toán tương đối hợp lý. Tác giả kiến nghị đối với đập vòm cao trên 60 m (công trình cấp 1 và 2) đều cần tính toán bổ sung “*ứng suất tương đương phần tử hữu hạn*”, đây được xem là một trong những chỉ tiêu đánh giá

tiêu chuẩn độ an toàn cường độ đập lớn.

Tài liệu tham khảo

[1] FUYO Zuo-xin. Phân tích và tính toán vấn đề cơ học kết cấu thủy công. Nhà xuất bản Đại học Hà hải, Nam Kinh, 1993.

[2] LI Tong-chun, WEN Zhao-wang. The method of finite element internal force for analysis

of arch dam stresses. Journal of Hydroelectric Engineering , 2002, 79(4): 18-24.

[3] ZHANG Hang-hui, LI Tong-chun, WEN Zhao-wang. Method of Finite Element Internal Force for Arch Dam Equivalent Stress Analysis. 2003, 19(2): 23-26.

[4] LI Tong-chun, ZHANG Hang-hui. An improved method for analysis of arch dam equivalent stress. Journal of Hohai University, 2004, 31(1): 104-107.

[5] LI Tong-chun, CHEN Hui-fang, ZHANG Hang-hui, WANG Ren-kun. Effect of mesh size on analysis of arch dam equivalent stress. Journal of Water Resources, 2004, 9, 83-87.

[6] P.R. China. Design specification for concrete arch dams SL 282-2003, 2003.