

PHÂN TÍCH TƯƠNG TÁC GIỮA KHỐI NƯỚC VÀ KẾT CẤU CẦU MÁNG BÊ TÔNG BẰNG PHƯƠNG PHÁP FSI

Khúc Hồng Vân¹, Nguyễn Đình Thắng²

Tóm tắt: Hiện nay khi phân tích kết cấu làm việc trong môi trường nước thường đưa tải trọng áp lực nước về tải trọng tĩnh gán lên bề mặt kết cấu. Tuy nhiên khi kết cấu chịu tải trọng áp lực nước biến thiên theo thời gian thì phương pháp trên không phản ánh đúng trạng thái làm việc của kết cấu. Phương pháp tương tác trực tiếp giữa khối nước và kết cấu (FSI) có thể giải quyết được vấn đề này thông qua các phần mềm phân tích phần tử hữu hạn thông dụng. Phần mềm ADINA là một trong những phần mềm mạnh có thể mô phỏng tốt tương tác động lực học giữa khối nước và kết cấu công trình. Bài báo thông qua một ví dụ cụ thể phân tích kết cấu cầu máng dẫn nước chịu tác dụng của động đất để thấy rõ hiệu quả của phương pháp FSI.

Từ khóa: Phương pháp FSI; Kết cấu cầu máng; Động đất.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Những năm gần đây, để đáp ứng yêu cầu thực tế ngày càng cao của xã hội đòi hỏi những nhà thiết kế không ngừng nghiên cứu tìm tòi giải pháp kỹ thuật mới nhằm nâng cao hiệu quả và chất lượng công việc. Phương pháp FSI (Fluid Structure Interaction) là một phương pháp cho phép người thiết kế mô phỏng được trạng thái làm việc thực của kết cấu khi tương tác trực tiếp với môi trường nước xung quanh thay thế cho phương pháp gán tải truyền thống.

Trong hệ thống công trình thủy lợi, cầu máng được sử dụng trong trường hợp khi tuyến dẫn nước đi qua các vùng trũng như sông, thung lũng, ... Phương pháp thiết kế kết cấu cầu máng truyền thống coi khối nước trong máng là tải trọng ngoài tác dụng lên kết cấu, vì vậy khi cầu máng dẫn nước chịu tác dụng của động đất thường không phản ánh đúng trạng thái làm việc của kết cấu. Trong phạm vi bài báo này, tác giả giới thiệu kết quả nghiên cứu sự thay đổi ứng suất và chuyển vị của kết cấu trong quá trình tương tác với khối nước trong máng, đồng thời đánh giá sự biến đổi của áp lực nước do chính sự tác động

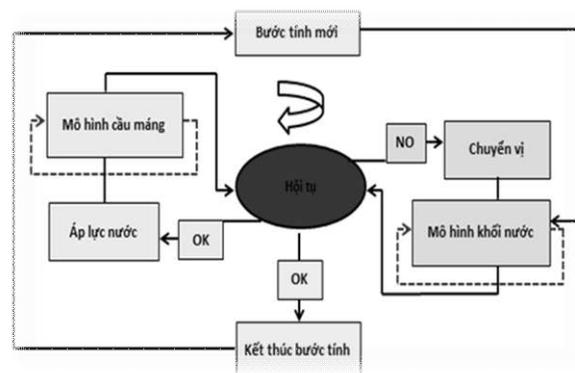
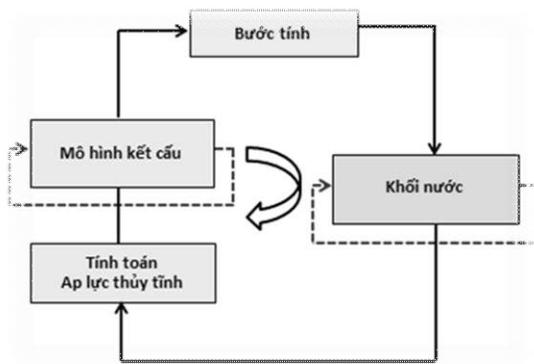
ngược lại của chuyển vị của kết cấu gây ra. Phương pháp FSI cho phép phân tích được cùng một lúc hai chiều sự tác động qua lại giữa kết cấu và chất lỏng.

2. PHƯƠNG PHÁP TƯƠNG TÁC GIỮA KẾT CẤU VÀ KHỐI NƯỚC

Hiện nay, phương pháp truyền thống phân tích ứng suất và chuyển vị của kết cấu làm việc trong môi trường nước đều dựa trên nguyên tắc tính toán trị số áp lực nước sau đó gán áp lực lên bề mặt kết cấu theo Hình 2.1 (trái). Tuy nhiên, cách tính này chỉ phân tích được một chiều sự tác động của khối nước lên kết cấu mà không xét tới sự tác động trở lại của kết cấu lên khối nước. Với phương pháp FSI (Dohmen. H.J., 2011), khi kết cấu dao động với khối nước, khối nước tương tác với kết cấu sẽ có cùng gia tốc, vận tốc và chuyển vị với kết cấu và lực quán tính, lực cản, lực đàn hồi của khối nước được gán lên kết cấu làm cho khối lượng, độ cứng của hệ thống dao động bị thay đổi từ đó dẫn đến sự thay đổi đặc tính dao động kết cấu theo Hình 2.1 (phải). Phương pháp này không chỉ cho phép phân tích chuyển vị và ứng suất của kết cấu mà còn xét tới sự tương tác trở lại của kết cấu lên khối nước, từ đó đánh giá được những ảnh hưởng bất lợi của điều kiện ngoại cảnh lên công trình.

¹ Bộ môn Kết cấu công trình, Khoa Công trình, Trường Đại học Thủy lợi

² Sinh viên K57-CT1, Trường Đại học Thủy lợi



Hình 2.1. Sơ đồ tính theo phương pháp truyền thống (trái) và phương pháp FSI (phải)

3. PHƯƠNG TRÌNH CƠ BẢN TƯƠNG TÁC GIỮA KHỐI NƯỚC VÀ KẾT CẤU

Chuyển vị và ứng suất của kết cấu tại mỗi bước tính toán được xác định theo phương pháp “step-by-step” được Newmark phát triển (Clough, R.W., 2003) dựa trên hệ thống kết hợp hai phương trình của khối nước và kết cấu dưới đây:

$$M\ddot{u} + K\dot{u} = f_1 - M\dot{u}' + Q \quad (1)$$

$$M_p \ddot{p} + K' p = F - \rho Q^T (\ddot{u} + \ddot{u}') \quad (2)$$

trong đó: M là ma trận khối lượng của kết cấu, K là ma trận độ cứng của kết cấu. M_p and K' lần lượt là ma trận khối lượng và ma trận độ cứng của khối nước. f_1 là véc tơ tải trọng, u véc tơ chuyển vị, u' véc tơ gia tốc của kết cấu, u'' là gia tốc trọng trường, p là véc tơ của áp lực nước theo thời gian, \ddot{p} là hàm vi phân bậc 2 tương ứng của áp lực nước theo thời gian. Q là ma trận kết hợp của khối nước và kết cấu (Taylor, R.L., 2000). Cuối cùng, F là lực tương tác tác động lên kết cấu do gia tốc của khối nước, ρ trọng lượng riêng của nước. Ma trận cản nhớt C của nước được bỏ qua trong tính toán.

4. PHÂN TÍCH TƯƠNG TÁC GIỮA KẾT CẤU VÀ KHỐI NƯỚC TRONG MÁNG

4.1. Mặt cắt tính toán

Kích thước mặt cắt ngang máng:

$H=5.1\text{m}$: Chiều cao thành máng.

$B=5\text{m}$: Chiều rộng đáy máng.

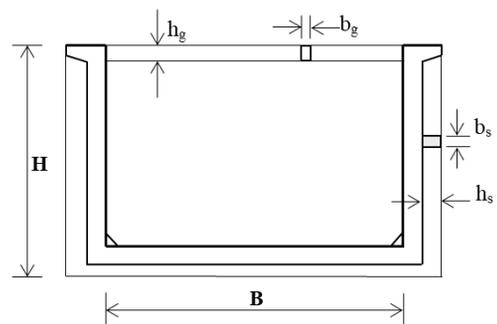
$h_s = b_s = 40\text{cm}$: Sườn ngang.

$h_g = b_g = 40\text{cm}$: Thanh giằng ngang.

$l_g = 3\text{m}$: Khoảng cách giữa các thanh giằng.

$L=15\text{m}$: Chiều dài nhịp tính toán của 1 khoang.

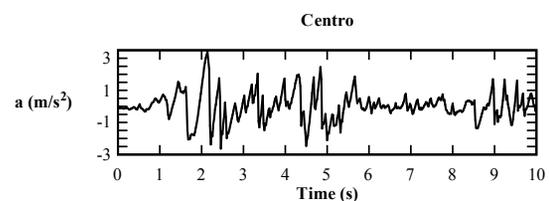
$t=40\text{cm}$: Chiều dày thành máng, đáy máng



Hình 2.2. Mặt cắt ngang tính toán của cầu máng

4.2. Băng gia tốc động đất

Nghiên cứu dựa trên điều kiện giả định công trình chịu tác động của trận động đất Centro (Hoa Kỳ) với băng gia cho trên hình Hình 2.3 trong thời gian 10 (s).



Hình 2.3. Băng gia tốc động đất theo thời gian của trận động đất Centro

4.3. Thiết lập mô hình tính toán

Đặt ra bài toán là sự tương tác giữa kết cấu cầu máng dẫn nước trong hệ thống công trình thủy lợi và khối nước trong máng, từ đó phân tích ứng suất và chuyển vị của kết cấu cầu máng, đồng thời phân tích sự thay đổi áp lực nước trong các điều kiện bình thường và động đất.

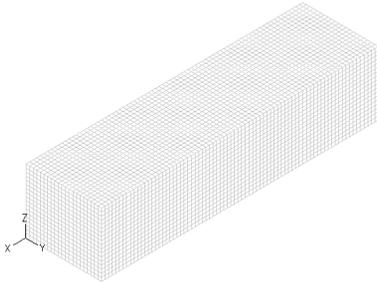
Mô hình khối nước

Khối nước được coi là chất lỏng không nén được, bỏ qua lực cản nhớt và mô phỏng dựa trên mô hình

LES trong CFD (Computer Fluid Dynamic).

Thông số đầu vào khối nước như sau:

- + Trọng lượng riêng: 1000kg/m^3 .
- + Độ nhớt: 0.001 kg/m.s (theo TCVN 2117 – 77 ở nhiệt độ 20°C và áp suất không khí $1,01325\text{ at}$).
- + Cột nước lớn nhất: 3.5m

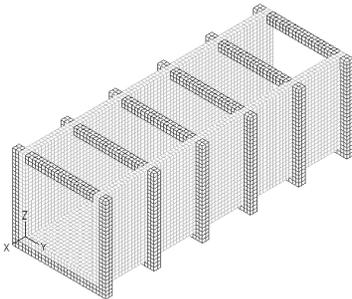


Hình 3.1. Khối nước

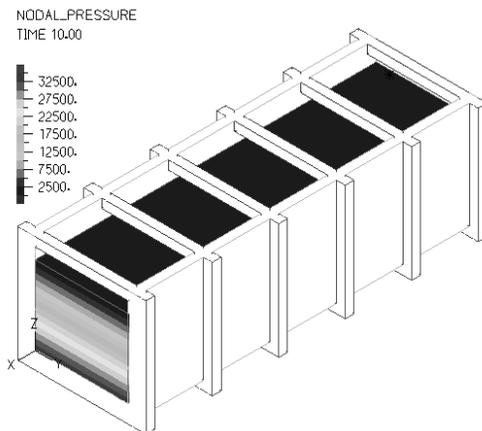
Kết cấu cầu máng

Kết cấu cầu máng được mô phỏng dựa trên mô hình ADINA Structure. Giả thiết vật liệu bê tông đàn hồi và đẳng hướng. Thông số đầu vào của bê tông cầu máng như sau:

- + Trọng lượng riêng bê tông: 2500 kg/m^3
- + Hệ số Poisson $\mu = 0.2$
- + Mô đun đàn hồi: $2,9 \times 10^{10}\text{ (N/m}^2\text{)}$



Hình 3.2. Kết cấu cầu máng



Hình 4.1. Mô hình hiển thị áp lực nước trong điều kiện thường

4.4. Biến gia tốc động đất theo thời gian

Rung chấn động đất được giả thiết kéo dài trong khoảng thời gian 10(s). Rung chấn này được chia nhỏ thành 250 khoảng thời đoạn, mỗi thời đoạn cách nhau 0.04 (s) sẽ đảm bảo việc khảo sát chính xác sự thay đổi ứng suất và chuyển vị đồng thời giảm được khối lượng tính toán.

4.5. Trường hợp tính toán

Nghiên cứu đặt ra trong điều kiện kết cấu cầu máng làm việc bình thường và khi xảy ra động đất. Với bài toán động đất, giả sử có hai trường hợp tác dụng của động đất. TH1 là khi chỉ tác dụng theo phương thẳng đứng Z theo hướng bất lợi nhất cho tính võng tại vị trí giữa nhịp máng và TH2 là tác dụng theo cả hai phương đứng Z và ngang Y nhằm gia tăng áp lực nước theo phương ngang.

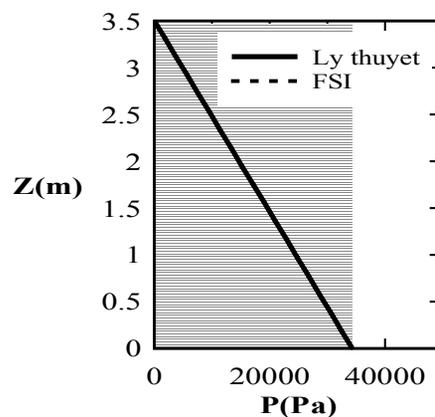
Bảng 1. Trường hợp tính toán động đất

Phương động đất	x	y	z
TH1-a(z)	0	0	-1
TH2-a(z,y)	0	-0.8	-1

4.6. Phân tích kết quả áp lực nước tăng thêm

4.6.1. Điều kiện thường

Phương pháp FSI phân tích áp lực nước tăng thêm khi điều kiện bình thường, áp lực nước thay đổi theo chiều sâu cột nước và phù hợp với phương pháp tính toán áp lực truyền thống.



4.6.2. Điều kiện xảy có động đất

Trong thực tế, sự gia tăng áp lực nước trong máng do động đất phụ thuộc vào rất nhiều yếu tố trong đó phải kể đến yếu tố như bề rộng tiếp xúc của khối nước với kết cấu thông qua bề rộng B và chiều cao H. Ở trong nghiên cứu này, nghiên cứu được áp dụng cho một mô hình công trình cầu máng với thông số thiết kế đã cho ứng với băng gia tốc động đất giả định để tìm ra áp lực tăng thêm phù hợp với quy luật của phương pháp Westergaard, (1933) là hàm bậc 2 đơn giản (Hình 4.2) có thể xác định nhanh giá trị tăng thêm của động đất thông qua chiều sâu cột nước khảo sát $z_i(m)$ theo dạng phương trình sau:

Đối với động đất Centro a_z :

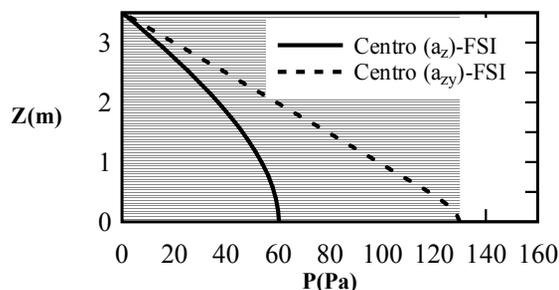
$$P = f_1(z) = 61,33 - 4,01z - 3,81z^2 \quad (3)$$

Đối với động đất Centro a_{zy} :

$$P = f_2(z) = 133,9 - 34,81z - 1,05z^2 \quad (4)$$

Với cách làm đơn giản này, phương pháp FSI cho phép xác định được **chính xác quy luật** của áp lực nước tăng thêm tác dụng lên công trình có kích thước xác định do tác dụng của động đất

mà phương pháp truyền thống không thể đánh giá được.



Hình 4.2. Biểu đồ thể hiện sự thay đổi áp lực nước theo độ sâu Z(m)

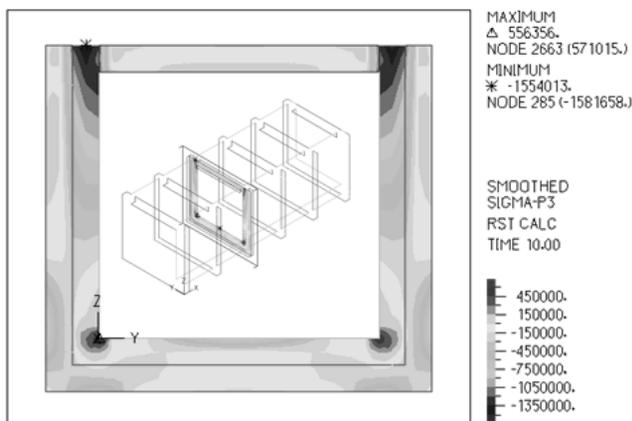
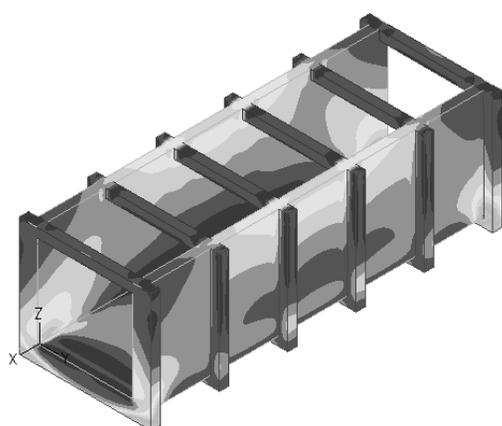
4.7. Phân tích ứng suất thân máng

4.7.1. Ứng suất lớn nhất

Bảng tổng hợp ứng suất nguy hiểm của kết cấu máng theo các phương được thống kê trong Bảng 2 với ứng suất chứng kiến tăng từ 5% đến gần 18% cho cả hai trường hợp phương ảnh hưởng của động đất.

Bảng 2. Bảng tổng hợp ứng suất của kết cấu cầu máng theo các phương tăng thêm do động đất

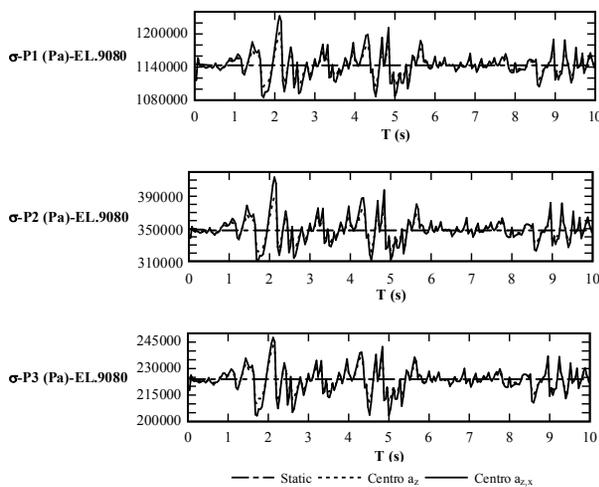
Phương rung chấn (Centro)	Ứng suất (kN/m ²)					
	P1		P2		P3	
	Max(+)	Min(-)	Max(+)	Min(-)	Max(+)	Min(-)
ZY	1231.19 (6.9%)	1087.145 (5.12%)	413.12 (17.8%)	311.01 (10.6%)	248.191 (10.44%)	204.961 (7.59%)
Z	1210.13 (5.09%)	1122.354 (2.05%)	386.06 (9.62%)	320.138 (8.01%)	242.161 (7.76%)	211.347 (4.72%)
Tính	1151.457	1145.91	352.178	348.021	224.721	221.813



Hình 4.3. Ứng suất P3 dọc máng và trên mặt cắt khung giằng

Phân tích ứng suất lớn nhất theo các phương, đối với trường hợp động đất tác dụng theo phương ZY có trị số lớn nhất và ứng suất cục bộ chủ yếu tập trung tại các góc. Mô hình thể hiện ứng suất dọc máng theo phương Z (P3) được thể hiện trên hình Hình 4.3 và ứng suất tại mặt cắt khung giằng cho thấy rõ vị trí của ứng suất tập trung xung quanh các góc bản đáy với vách và dọc thanh giằng trên đỉnh máng.

4.7.2. Phân tích ứng suất theo thời gian



Hình 4.4. Ứng suất thay đổi theo phương P1, P2, P3

Phân tích ứng suất của kết cấu theo thời gian được phân tích trên phần tử EL.9080 nằm tại góc bản đáy với vách trên mặt cắt giữa nhịp cầu máng theo các phương trục X (P1); trục Y (P2) và trục Z (P3), kết quả thu được thể hiện trên các biểu đồ Hình 4.4

Từ các biểu đồ thể hiện sự thay đổi ứng suất theo thời gian, đối với trường hợp rung chấn động đất tác dụng ứng suất của kết cấu thay đổi liên tục theo thời gian. Ứng suất đạt max và min lần lượt tại thời điểm 2.12(s) và 7.42(s) với độ trễ pha 0.08 (s) với thời gian gia tốc động đất là lớn nhất 3 m²/s và nhỏ nhất 0.0018 m²/s. Điều này chứng minh sự biến thiên của ứng suất tỷ lệ thuận với giá trị của gia tốc động đất tác dụng và độ cứng của máng ảnh hưởng rất lớn đến độ trễ pha của kết cấu so với gia tốc động đất.

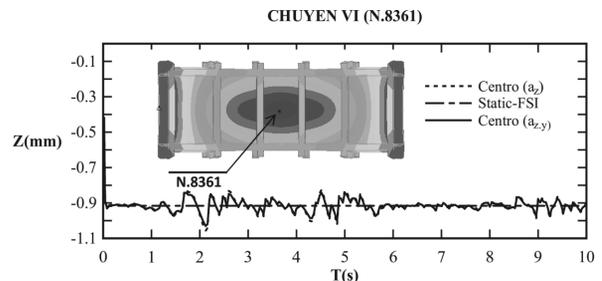
4.8. Chuyển vị thân máng

4.8.1 Chuyển vị lớn nhất tại 1 thời điểm

Tiến hành hiển thị trị số chuyển vị lớn nhất trong các trường hợp khác nhau, kết quả thu được

Nút 8361 đạt chuyển vị lớn nhất trong các trường hợp rung chấn động đất az, Uz = 1.05mm, theo cả phương đứng và phương ngang, Uz = 1.001 mm và trong điều kiện bình thường Uz = 0.943 mm. Kết quả này hợp lý bởi khi rung chấn tác dụng theo chỉ một phương đứng sẽ có khả năng gây ra chuyển vị lớn nhất cho kết cấu.

4.8.2 Phân tích chuyển vị theo thời gian



Hình 4.5. Biểu đồ chuyển vị theo thời gian

Tiến hành phân tích chuyển vị của kết cấu theo thời gian tại vị trí có chuyển vị lớn nhất N.8361 trên bản đáy được thể hiện trên Hình 4.5. Từ biểu đồ nhận thấy trị số chuyển vị thay đổi liên tục theo thời gian trong quá trình làm việc, đặc biệt trong trường hợp kết cấu chịu tác dụng của rung chấn động đất.

5. KẾT LUẬN

(1) Phương pháp FSI đưa ra **kết quả chính xác**, trực quan về sự thay đổi ứng suất biến dạng của kết cấu theo thời gian khi tương tác trực tiếp với khối nước trong điều kiện tải trọng động mà phương pháp truyền thống **không thể phân tích được**.

(2) Bằng việc tìm ra quy luật bậc 3 biểu đồ tăng thêm áp lực nước do động đất giúp cho công tác thiết kế, kiểm tra sự tác động ảnh hưởng của động đất được cụ thể và rõ ràng hơn cho từng vùng nghiên cứu.

(3) **Phương pháp mới** (FSI) tương tác giữa khối nước và kết cấu **nên được xem xét thay thế cho phương pháp gán tải truyền thống áp dụng cho công trình thủy lợi**. Đặc biệt phương pháp này rất hiệu quả trong việc phân tích, nghiên cứu các kết cấu phức tạp khi tương tác trực tiếp với khối nước như kết cấu cửa van, **tràn qua đập bê tông trọng lực hay cửa lấy nước vào nhà máy thủy điện, tháp van cống ngầm...**

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Clough. R.W., (2003), and Penzien. J., "Dynamics of structures", Third edition by Computers&Structures, Inc. 1995 University Ave. Berkeley, CA 94704 USA.
- Dohmen. H.J., (2011), Benrs. K.F., Schuster. S., Wan. B., "A comparison of oneway and two-way coupling methods for numerical analysis of fluid structure interactions", Journal of applied mathematics
- Khúc Hồng Vân, (2018), "Fluids and structures interaction analysis on vertical lift gate in tidal region of Vietnam", Luận án tiến sĩ.
- Westergaard, (1933), "Water Pressures on Dams during Earthquakes", Transactions of the American Society of Civil Engineers.
- Taylor. R.L., (2000), and Zienkiewicz. O.C., "The Finite Element Method", (5th Edition). Oxford: Butterworth- Heinemann.

Abstract:

ANALYSIS ON COUPLING SYSTEM OF FLUIDS AND AQUEDUCT WATER BRIDGE BASE ON FSI METHOD

The analysis fluid structure interaction (FSI) have been attracted many researchers in the recent years. FSI method becomes a crucial consideration in the design and analysis of various engineering field. FSI allow to replaces the traditional method of assign load on structure by the way that the block of water can act directly on structure over time. However, the coordination of FSI is a difficult problem since the coordinate system which used in describing block of water and the structure is not uniform. In this research using FSI method with a help of ADINA software to solve the problem of fluid and aqueduct interaction for obtained the displacement and stress of structure duration time of earthquake. Due to the influence of earthquake motivation, the static traditional analytical method cannot accurately simulation thus more attention is paid to the FSI method. Other important task of this study is the characteristic of hydrodynamic pressure of flow influence by earthquake can be simplified in expression as mathematical equation based on the relationship of the water depth, the acceleration. The research of FSI can further apply on dynamic response of water resource such the spin-way or dam, turbine in the hydropower.

Keywords: FSI (Fluid and Structure Interaction); Aqueduct water bridge; Earth-quake.

Ngày nhận bài: 18/6/2019

Ngày chấp nhận đăng: 06/9/2019