

MÔ HÌNH SÓNG LAN TRUYỀN VÀO VÙNG VEN BỜ THEO PHƯƠNG TRÌNH BOUSSINESQ HAI CHIỀU

ThS. Nguyễn Bá Thủy

Trung tâm Khí tượng Thủy văn Biển

ThS. Vũ Hải Đăng

Phân viện Hải dương học Hà Nội

Mô hình tính sóng ven bờ dựa trên phương trình Boussinesq 2 chiều của Madsen và Sorensen (1992) đã được ứng dụng và phát triển cao hơn. Mô hình đã mở rộng tính cho sóng đổ (wave breaking) thông qua việc kết hợp với mô hình năng lượng rời của của Kenedy và Chen (2000). Việc tính sóng leo bờ (wave runup) được sử dụng kỹ thuật biên khe hẹp của Tao (1983) và Kenedy (2000). Mô hình đã được kiểm chứng và tính toán thử nghiệm cho 3 trường hợp: không có sóng đổ, có sóng đổ và kết hợp tính sóng đổ và sóng leo. Kết quả tính toán thử nghiệm được so sánh với các số liệu thí nghiệm của Kirby và Chawla (1996) và Bowen (1968) mô hình được đánh giá có độ tin cậy cao.

1. Mở đầu

Sóng biển là một nhân tố quan trọng trong việc xác định hình thái vùng ven bờ phục vụ cho quy hoạch, thiết kế các công trình ven bờ. Hiện nay, đã có một số mô hình thông dụng được sử dụng vào tính toán trường sóng ven bờ như mô hình RCPWAVE, mô hình SWAN. Các mô hình này dựa trên việc giải phương trình dốc thoải (mild slope) và cho kết quả rất tốt trong điều kiện địa hình dốc thoải và không phức tạp. Tuy nhiên, một trong những hạn chế của các mô hình trên là không tính đến hiện tượng phản xạ sóng, độ cao sóng leo và không mô tả được bản chất thật của quá trình sóng đổ. Phương trình Boussinesq đã được sử dụng rộng rãi cho việc tính toán sóng lan truyền từ vùng nước sâu vào vùng ven bờ và cho kết quả tính toán có độ tin cậy cao. Phương trình mô tả được sự kết hợp các hiện tượng trong quá trình sóng phát triển và lan truyền như hiện tượng nước nông, khúc xạ, nhiễu xạ và phản xạ, điều này chứng tỏ một số mô hình tính toán trước đó đã có những hạn chế nhất định. Tuy nhiên, bản thân phương trình Boussinesq không thể tính được cho trường hợp sóng đổ khi lan truyền vào vùng nước nông cũng như sóng leo bờ. Việc kết hợp với mô hình nhót, rời và sử dụng kỹ thuật biên khe hẹp đã giúp cho mô hình giải quyết được vấn đề phức tạp trên.

2. Phương trình Boussinesq hai chiều

Mô hình tính sóng 2 chiều được dựa trên việc giải phương trình Boussinesq 2 chiều của Madsen và Sorensen (1992). Đây là phương trình đã được cải tiến những đặc trưng về biến đổi sóng tuyến tính ở vùng nước sâu từ phương trình Boussinesq nguyên thủy của Penegrine (1967). Trong trường hợp tính sóng 2 chiều, hệ phương trình:

(a) Phương trình liên tục

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

(b) Phương trình động lượng

- Theo phương x

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_x^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q_x Q_y}{D} \right) + gD \frac{\partial \zeta}{\partial x} = & \left(\beta + \frac{1}{3} \right) h^2 \left(\frac{\partial^3 Q_x}{\partial t \partial x^2} + \frac{\partial^3 Q_y}{\partial t \partial x \partial y} \right) + \beta g h^3 \left(\frac{\partial^3 \zeta}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 \zeta}{\partial x \partial y^2} \right) \\ & + h \frac{\partial h}{\partial x} \left(\frac{1}{3} \frac{\partial^2 Q_x}{\partial t \partial x} + \frac{1}{6} \frac{\partial^2 Q_y}{\partial t \partial y} \right) + h \frac{\partial h}{\partial y} \left(\frac{1}{6} \frac{\partial^2 Q_y}{\partial t \partial x} \right) + \beta g h^2 \left\{ \frac{\partial h}{\partial x} \left(2 \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial h}{\partial y} \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x \partial y} \right\} + R_{bx} \end{aligned} \quad (2)$$

- Theo phương y

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q_y^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_x Q_y}{D} \right) + gD \frac{\partial \zeta}{\partial y} = & \left(\beta + \frac{1}{3} \right) h^2 \left(\frac{\partial^3 Q_y}{\partial t \partial y^2} + \frac{\partial^3 Q_x}{\partial t \partial x \partial y} \right) + \beta g h^3 \left(\frac{\partial^3 \zeta}{\partial y^3} + \frac{\partial^3 \zeta}{\partial x^2 \partial y} \right) \\ & + h \frac{\partial h}{\partial y} \left(\frac{1}{3} \frac{\partial^2 Q_y}{\partial t \partial y} + \frac{1}{6} \frac{\partial^2 Q_x}{\partial t \partial x} \right) + h \frac{\partial h}{\partial x} \left(\frac{1}{6} \frac{\partial^2 Q_x}{\partial t \partial y} \right) + \beta g h^2 \left\{ \frac{\partial h}{\partial y} \left(\frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x \partial y} \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

Trong đó:

ζ - dao động mực nước, Q_x , Q_y - tích phân của vận tốc theo hướng x và y, h - độ sâu thời điểm ban đầu, d - độ sâu tức thời ($d=h+\zeta$), g - gia tốc trọng trường, β - hệ số phân tán ($\beta=0,15$).

3. Mô hình sóng đổ hai chiều

Một trong những hạn chế của phương trình Boussinesq là bản thân nó không thể tính được sóng đổ và sóng leo bờ. Do vậy, phương trình Boussinesq cần kết hợp với các mô hình tính toán khác. Trong mô hình này, quá trình sóng đổ được mô phỏng bằng mô hình nhót, rồi. Quá trình này diễn ra rất mạnh ở fron phía trước của sóng. Trong mô hình này, năng lượng tiêu tán do độ nhót, rồi được sử dụng theo phương pháp của Kennedy và Chen (2000). Khi đó 2 thành phần nhót, rồi theo phương x và y (R_{bx} , R_{by}) được cộng vào thành phần vế phải của phương trình động lượng, trong khi đó phương trình liên tục được giữ nguyên.

Thành phần gây sóng đổ được diễn tả theo phương trình:

$$R_{bx} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial Q_x}{\partial x} \right) + \frac{1}{2} \left[\frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial Q_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial Q_y}{\partial x} \right) \right] \quad (4)$$

$$R_{by} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial Q_y}{\partial y} \right) + \frac{1}{2} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial Q_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial Q_y}{\partial x} \right) \right] \quad (5)$$

Độ nhót rồi được tính:

$$\nu = B \delta_b (h + \zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad (6)$$

Trong đó: δ_b - hệ số kích thước pha trộn, thường được lấy theo giá trị thực nghiệm bằng 1,2, hệ số B - đại lượng kiểm soát quá trình phân tán năng lượng khi sóng đổ xuất hiện, đại lượng này biến đổi một cách ngẫu nhiên trong khoảng từ 0 tới 1, để tránh quá trình đổ bị sốc.

4. Mô hình biên di động, sóng leo

Trường hợp tính sóng leo bờ, một trong những nhiệm vụ phức tạp là việc xác định biên di động khi sóng truyền thẳng vào bờ. Việc xác định vị trí đường biên ven bờ cho mô hình tính, toàn bộ miền tính toán được mở rộng cho đến vị trí mà tại đó giá trị lớn nhất của sóng leo có thể đạt tới. Phương pháp này đã được Kennedy (2000) đã cải tiến từ phương pháp của Tao (1983) và mô hình đã vận dụng phương pháp này. Ý tưởng của phương pháp này: phân biên cứng là rỗng hoặc chứa nhiều khe hẹp, nhờ đó nước do sóng chuyển động có thể dâng lên bờ. Độ rộng của khe hẹp càng bé, tính bảo toàn động lượng càng cao và mô hình có độ chính xác cao hơn. Sử dụng phương pháp này, độ rộng của kênh truyền sóng được tính theo công thức:

$$b(\zeta) = \begin{cases} 1, & \zeta \geq z^* \\ \delta + (1-\delta)e^{-\lambda(\eta-z^*)/ho}, & \zeta < z^* \end{cases} \quad (7)$$

Trong đó: δ - độ rộng của khe hẹp, λ - hệ số điều khiển quá trình biến đổi của diện tích kênh truyền sóng, h_0 - độ sâu, z^* - giá trị mực nước mà tại đó $b=1$.

Diện tích mặt cắt được xác định theo công thức cải tiến của Kennedy (2000):

$$A(x, y, t) = A(\zeta) \equiv \int_{\eta}^{\eta} b(z) dz \quad (8)$$

$$\text{Hay: } A(\zeta) = \begin{cases} (\zeta - z^*) + \delta(z^* + ho) + \frac{(1-\delta)ho}{\lambda} (1 - e^{-\lambda(1+z^*/ho)}) & \zeta \geq z^* \\ \delta(\zeta + ho) + \frac{(1-\delta)ho}{\lambda} e^{-\lambda(\eta-z^*)/ho} (1 - e^{-\lambda(1+z^*/ho)}) & \zeta < z^* \end{cases} \quad (9)$$

Giá trị z^* được tính theo công thức:

$$z^* = \frac{-h}{(1-\delta)} + ho \left(\frac{\delta}{1-\delta} + \frac{1}{\lambda} \right) \quad (10)$$

Kết hợp phương trình Bousinesq 2 chiều với mô hình sóng đổ và sử dụng kỹ thuật biên khe hẹp, hệ phương trình cuối cùng của mô hình tính như sau:

(a) Phương trình liên tục

$$b \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = 0 \quad (11)$$

(b) Phương trình động lượng

- Phương trình theo phương x

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_x^2}{A} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q_x Q_y}{A} \right) + gA \frac{\partial \zeta}{\partial x} - R_{bx} + E_x + \dots = 0 \quad (12)$$

- Phương trình theo phương y

$$\frac{\partial Q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_x Q_y}{A} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q_y^2}{A} \right) + gA \frac{\partial \zeta}{\partial y} - R_{by} + E_y + \dots = 0 \quad (13)$$

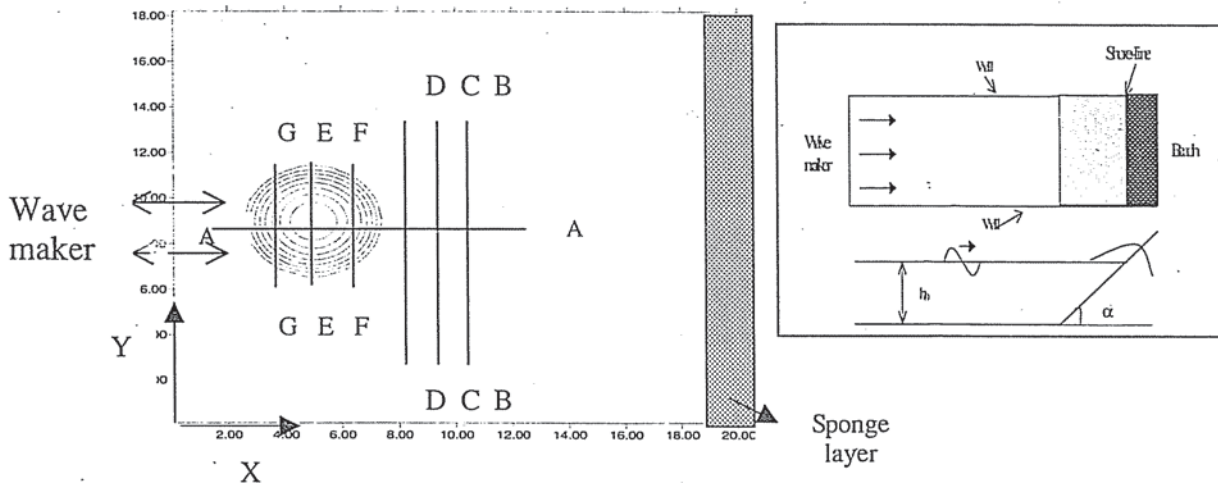
Trong đó: R_{bx} , R_{by} - thành phần gây sóng đồ theo phương x và y đã được mô tả trong mục 3. E_x và E_y - thành phần gây hấp thụ sóng để tránh hiện tượng phản xạ từ biên. b và A - bề rộng và diện tích tương đối của kênh truyền sóng. Hệ phương trình trên được sai phân hoá trung tâm theo thời gian và sai phân tiến theo không gian với các điểm tính được xác định theo ô lưới hình chữ nhật. Phương pháp ẩn hướng luân phiên ADI (Alternating Direction Implicit) đã được áp dụng cho việc giải hệ phương trình sai phân.

5. Kiểm chứng độ tin cậy của mô hình

Để có thể đánh giá độ tin cậy của mô hình, tác giả đã thử nghiệm mô hình cho trường hợp sóng lan truyền qua 1 đảo ngầm, hình tròn xoay tròn ốc và so sánh với kết quả của thí nghiệm. Trong thí nghiệm này, cả hai trường hợp; không có sóng đồ và có sóng đồ, sẽ được kiểm chứng. Việc sử dụng bể thí nghiệm như trên để kiểm chứng độ chính xác của mô hình là sự lựa chọn chính xác và khắt khe nhất để đánh giá độ tin cậy của mô hình. Thí nghiệm được thực hiện bởi Chawla và Kirby(1996). Hình 1 mô tả bể thí nghiệm, tại đó các máy thu số liệu về độ cao sóng được đặt theo các mặt cắt A-A đến G-G. Bể sóng có chiều dài là 20m, chiều rộng là 18,2m. Tâm của đảo được đặt tại vị trí $x=5m$, $y=8,98m$. Sóng được truyền từ biên phía bên trái của bể, phía phải của bể được đặt một lớp hấp thụ sóng có bề dày 3m. Bán kính của đảo được xác định theo phương trình:

$$(x-5)^2 + (y-8,98)^2 = (2,57)^2 \quad (14)$$

Trong đó h_0 là độ sâu của bể thí nghiệm



Hình 1. Sơ đồ bể thí nghiệm của Chawla & Kirby (bên trái) và Bowen (bên phải)

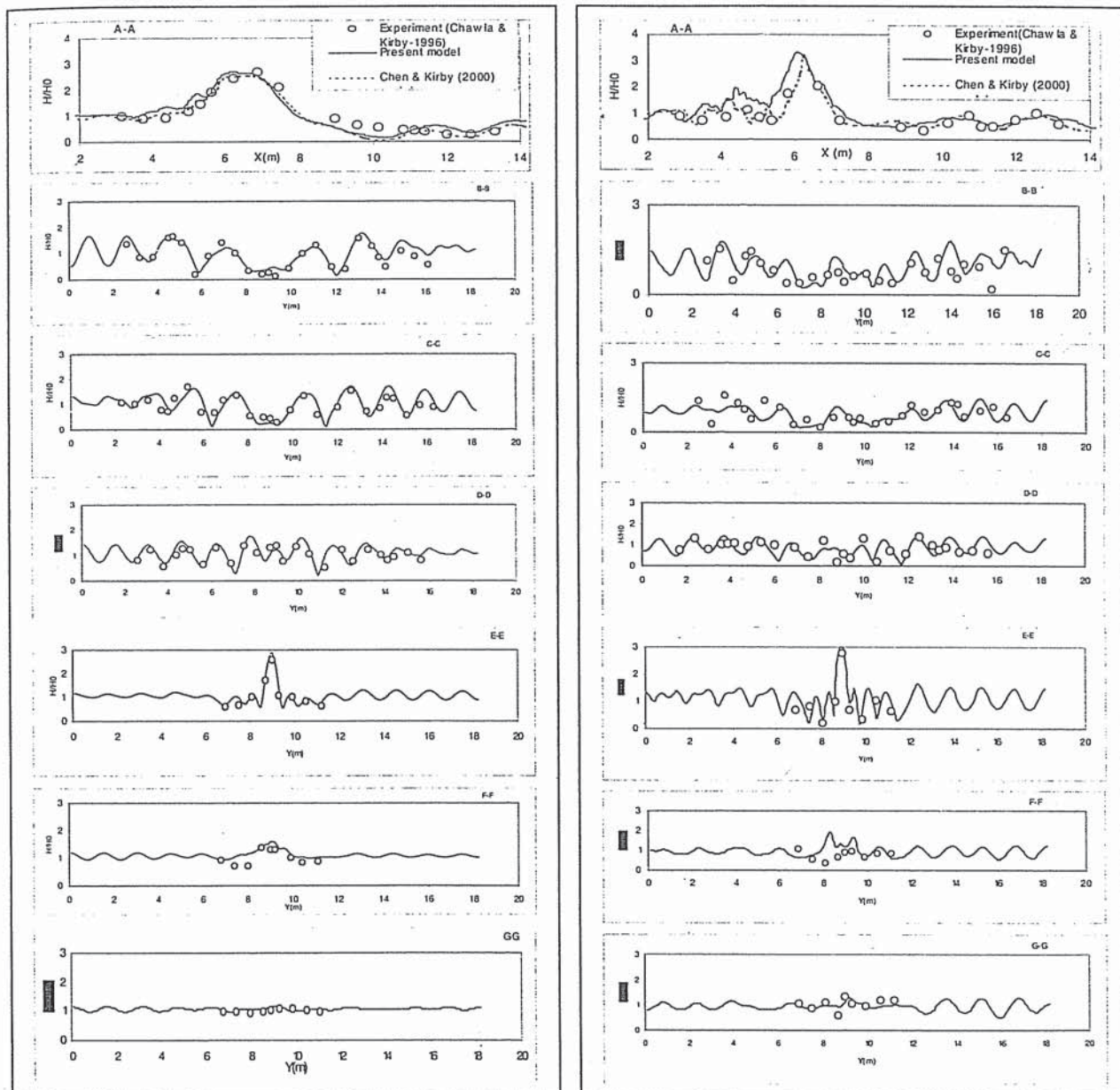
Độ sâu của các điểm trên đảo được xác định theo phương trình:

$$h = h_0 + 8.73 - \sqrt{82.81 - (x-5)^2 - (y-8.98)^2} \quad (15)$$

a. Trường hợp không có sóng đồ (non-breaking wave)

Trong trường hợp này độ cao sóng đầu vào tại biên là 1,18cm, chu kỳ là 1,0 giây, mực nước trong bể có độ sâu là 45cm, tương ứng lúc này tại tâm của đảo nơi

có mực nước thấp nhất là 8cm. Bước lưới tính theo không gian được chọn là 0,05, 0,1m theo hướng x, y tương ứng và 0,1 giây là bước thời gian tính toán. Mô hình được chạy ổn định trong 40 giây. Kết quả tính toán và số liệu thực nghiệm trên các mặt cắt được biểu diễn trên hình 2.a. Dọc theo mặt cắt A - A, tác giả nhận thấy rằng: mô hình đã dự báo rất tốt trường sóng phía trước và sau đảo. Sự hội tụ phía mặt sau của đảo xuất hiện là do hiện tượng khúc xạ sóng khi lan truyền qua đảo. Độ cao sóng lớn nhất được quan trắc đạt gấp 2,68 lần độ cao sóng đầu vào. Dọc theo các mặt cắt ngang B - B đến G - G, mô hình đã phản ánh rất tốt quá trình biến đổi theo phương ngang của trường sóng, các giá trị thí nghiệm và kết quả tính toán hầu như là trùng khớp.



(a). Trường hợp không xuất hiện sóng đổ

(b). Trường hợp có sóng đổ

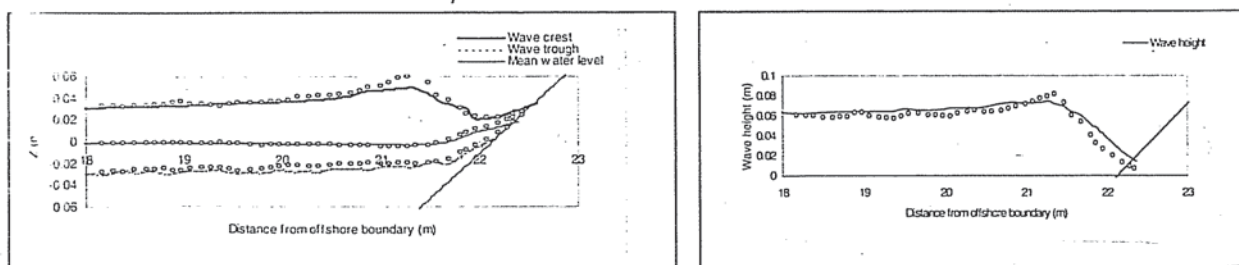
Hình 2. So sánh giữa kết quả tính toán và số liệu thực nghiệm trường hợp sóng lan truyền qua đảo ngầm

b. Trường hợp có sóng đổ xuất hiện (breaking wave)

Trường hợp thử nghiệm mô hình có sóng đổ, độ sâu của bể thí nghiệm được giảm xuống còn 39,5cm, độ cao và chu kỳ sóng tại biên tương ứng là 2cm và 1,0 giây. Do bởi mặt phía sau của fron sóng trong trường hợp sóng đổ là rất dốc, nên yêu cầu chọn bước lưới có độ mịn hơn là cần thiết để có thể xác định được chính xác vị trí sóng bắt đầu đổ, tác giả đã chọn lưới không gian theo hướng x, y là 0,025cm và bước thời gian là 0,1 giây được dùng cho tính toán. Trên hình 2.b biểu diễn kết quả tính toán của mô hình và so sánh với số liệu thực đo. Trường hợp này một vài hiện tượng bí ẩn được khám phá. Thứ nhất, tác giả thấy rằng: độ cao sóng không đạt cực đại tại đỉnh đảo khi thay vào đó là giá trị cực đại lại xuất hiện ở phía sau đảo, đây là đặc tính do hiện tượng khúc xạ gây nên. Thứ hai, hiện tượng sóng đổ và phân kỳ đã làm giảm độ cao sóng, sự giảm độ cao sóng trong trường hợp có sóng đổ nhanh hơn trường hợp không có sóng đổ xuất hiện. Mô hình tính toán cũng đã cho kết quả tương đối tốt sự biến đổi của trường độ cao sóng theo phương ngang. Kết quả tính toán trong 2 trường hợp, đồng thời được so sánh với kết quả tính toán của Chen và Kirby (2000) khi họ sử dụng phương trình Bousinesq phi tuyến tính cho cùng điều kiện thí nghiệm trên.

c. Sóng đổ và sóng leo bờ (breaking and run-up waves)

Để có thể kiểm tra độ chính xác của mô hình cho trường hợp sóng đổ và sóng leo bờ cùng xuất hiện, tác giả đã sử dụng kết quả thí nghiệm của Bowen (1968) để kiểm chứng độ tin cậy của mô hình. Trong thí nghiệm của Bowen, bể sóng được thiết kế với độ dốc là 0,082, độ sâu của bể là 50cm. Mô hình đã sử dụng các tham số sóng đầu vào để kiểm chứng độ tin cậy với độ cao là 0,065m, chu kỳ là 1,14 giây. Các tham số về mô hình sóng leo được sử dụng trong trường hợp này là $\delta = 0,005$ và $\lambda = 100$. Tác giả cũng nhận thấy rằng: để mô hình có thể chạy được ổn định thì việc lựa chọn bước thời gian cho tính toán ngắn là rất cần thiết, ở đây bước thời gian $\Delta t = 0,002$ giây. Kết quả tính toán và thực đo được biểu diễn trên hình 3. Trên hình 3.a biểu diễn sự biến đổi theo không gian của đỉnh sóng, bụng sóng và đường mực nước trung bình, các đường hình tròn bé là kết quả của số liệu thí nghiệm. Trên hình 3.b, sự so sánh giữa kết quả tính toán và số liệu thực đo của độ cao sóng. Tác giả nhận thấy rằng: mô hình đã diễn tả được các hiện tượng về sóng nước nông, sóng đổ, sóng leo và cho kết quả với độ tin cậy cao, mặc dù giá trị về độ cao sóng hơi nhỏ khi so sánh với thực nghiệm tại điểm sóng đổ xuất hiện và đường độ cao sóng sau khi đổ không được dốc như đường thực nghiệm.



(a) Đỉnh sóng, bụng sóng và mực nước trung bình

(b). Độ cao sóng

Hình 3. So sánh giữa kết quả tính toán và số liệu thí nghiệm của Bowen

6. Kết luận

Mô hình tính sóng lan truyền vào ven bờ dựa trên phương trình Boussinesq 2 chiều đã được ứng dụng phát triển. Mô hình đã được hoàn thiện bằng việc kết hợp với mô hình sóng đổ và sóng leo. Kết quả tính toán thử nghiệm và so sánh với giá trị thí nghiệm đã phản ánh được độ tin cậy của mô hình. Một trong những ưu điểm của mô hình khi so sánh với các mô hình khác đã được sử dụng trước đây, mô hình đã tính được hiệu ứng do phản xạ, tính sóng leo và đã mô tả được quá trình sóng đổ có độ tin cậy cao. Tuy nhiên, một số hạn chế của mô hình cũng cần được nêu ra, đó là thời gian tính toán lâu, độ ổn định của mô hình dựa trên phương trình Boussinesq không cao. Việc ứng dụng mô hình vào tính toán các điều kiện thực tế gặp nhiều phức tạp và đó cũng là vấn đề các báo cáo tiếp theo sẽ đề cập.

Tài liệu tham khảo

1. Chen, Q., Kirby, J.T., Dalrymple, R.A., Kennedy, A.B. and Chawla, A., 2000. Boussinesq Modeling of wave transformation, breaking and runup.II:2D. *Journal of waterway, Port coastal, and Ocean Engineering*/January/February, 48-55.
2. Kennedy, A. B, Chen, Q., Kirby, J. T., & Dalrymple, R. A. 2000. Boussinesq modeling of wave transformation, breaking and runup. I: One dimension. *J. Waterway of Port, Coastal and Ocean Engineering* 126: 39-47.
3. Madsen, P.A., Sorensen, O.R.,1992. A new form of the Boussinesq equations with improved lineardispersion characteristic: Part 2. A slowly varying bathymetry. *Coastal Eng.*18, 183-204.
4. Madsen, P.A., Sorensen, O.R., Shaffer, H.A., 1997. Surf zone dynamics simulated by a Boussinesq type model. Part I. Model description and cross-shore motion of regular waves. *Coastal Eng.* 32, 255-288