MỘT MÔ HÌNH SỐ CHO VÙNG SÓNG VỠ TRONG ĐÓ BAO GỒM CẢ LỚP BIÊN ĐÁY VÀ VÙNG SÓNG LEO
A BREAKING WAVES MODEL INCLUDING THE BOTTOM BOUNDARY LAYER AND THE SWASH ZONE

Nguyễn Thế Duy[*] và Tomoya Shibayama[**]

[*]Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Đại học Bách Khoa TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam
[**]Khoa Xây dựng, Đại học Quốc Gia Yokohama, TP. Yokohama, Nhật Bản

BẢN TÓM TẮT

Bài báo này trình bày một mô hình cho sóng vỡ, trong đó bao gồm cả lớp biên đáy và vùng sóng leo. Mô hình dựa trên các phương trình dạng Reynolds của dòng chảy rối không nén được. Lời giải số của mô hình được thiết lập trong một hệ thống lưới không đều nhằm thu được độ phân giải cao trong vùng gần đáy biển, nơi có gradient vận tốc rất lớn do ảnh hưởng của tính nhớt của chất lỏng. Quá trình chuyển động lên-xuống của sóng lan truyền trong vùng sóng leo cũng được nghiên cứu trong mô hình. Các kết quả số của mô hình đã được kiểm chứng bằng số liệu thí nghiệm đối với vùng sóng vỡ, lớp biên đáy và vùng sóng leo. Các so sánh cho thấy mô hình dự báo tốt các quá trình trong vùng sóng vỡ và lớp biên đáy. Đối với vùng sóng leo, lời giải số cho kết quả về cao độ mặt nước hơi lớn hơn số liệu thí nghiệm.

ABSTRACT

This paper presents a breaking waves model in which the wave boundary layer and the swash zone are also included in the model domain. The model is based on the Reynolds equations for incompressible turbulent flows. The numerical solution of the model is performed in a non-uniform grids system so that high resolution can be obtained in the near-bottom area, where the velocity gradients are very large due to viscous effect. The runup and rundown of progressive waves in the swash zone are also investigated. Numerical results of the present model are verified by laboratory data for the surf zone, the bottom boundary layer and the swash zone. The comparisons show that the model works well for the surf zone and the bottom boundary layer. For the swash zone, the water surface elevation is rather over-estimated by the numerical solution.

1. GIỚI THIỆU

Sóng biển lan truyền về phía bờ sẽ bị vỡ khi chiều cao sóng đạt tới một giá trị tới hạn so với chiều sâu nước. Sự vỡ sóng sẽ biến chuyển động sóng không quay thành chuyển động rối, đặc trưng bởi các xoáy cuộn có kích thước khác nhau. Do chuyển động rối này, năng lượng sóng truyền từ khơi vào sẽ bị tiêu hao trong suốt vùng sóng vỡ. Dưới ảnh hưởng của chuyển động rối do sóng vỡ tạo nên, chuyển động của chất lỏng trong vùng sóng vỡ vô cùng phức tạp. Việc mô phỏng sóng vỡ trong vùng nước nông vì vậy vẫn là một trong những đề tài thách thức nhất của lãnh vực nghiên cứu biển.

Sự phát triển gần đây của công cụ máy tính cũng như kỹ thuật tính toán đã cho phép mô phỏng sóng vỡ từ lời giải trực tiếp phương trình cơ bản và tổng quát của động lực học chất lỏng, phương trình Navier-Stokes. Tuy nhiên, việc mô phỏng dòng chảy rối theo tỉ lệ thật trong không gian và thời gian vẫn còn vượt quá khả năng của các máy tính hiện đại nhất hiện nay. Trong thực tế, kỹ thuật lấy trung bình theo thời gian (mô phỏng các đại lượng trung bình đồng pha) hay lấy trung bình theo không gian (mô phỏng xoáy cuộn lớn) thường được ứng dụng cho phương trình Navier-Stokes để thiết lập các phương trình dạng trung bình mà các máy tính hiện nay có thể giải được. Shibayama và Duy (1994) thiết lập một mô hình cho sóng vỡ dựa trên hệ phương trình Reynolds (dạng trung bình theo thời gian của phương trình Navier-Stokes), trong đó các thành phần ứng suất Reynolds kết hợp với một mô hình hệ số nhớt rối được dùng để mô phỏng chuyển động rối do sóng vỡ gây ra. Duy và Shibayama (1997) trình bày sự kết hợp giữa mô hình sóng 1994 được cải tiến của họ và một mô hình khuếch tán-đối lưu để nghiên cứu bùn cát lơ lửng trong vùng sóng vỡ. Lin và Liu (1998) giới thiệu một mô hình trong đó hệ phương trình Reynolds được kết hợp với mô hình k-ε để tính toán sóng vỡ. Yamada và Takikawa (1999) giải hệ phương trình Reynolds để mô phỏng sóng vỡ bổ nhào trên mái dốc đều. Watanabe và Saeki (1999) và sau đó Chistensen và Deigaard (2001) trình bày các mô hình khác nhau cho sóng vỡ dựa trên phương pháp mô phỏng xoáy cuộn lớn (large eddy simulation).

So sánh với các phương trình sóng thông thường, việc giải các dạng trung bình của phương trình Navier-Stokes thường khó khăn hơn nhiều và cũng tốn nhiều thời gian tính toán hơn vì những lý do chính sau đây:

(1) Số lượng điểm lưới cần thiết để phủ kín toàn bộ miền tính toán đối với mô hình 2 chiều thẳng đứng lẫn mô hình 3 chiều phải đủ lớn để đạt được độ phân giải tốt của các tham số sóng mô phỏng. Tuy nhiên, số điểm lưới không thể vượt quá một giới hạn nhất định tùy thuộc vào khả năng của máy tính và thời gian tính toán hợp lý.

(2) Mặt thoáng tự do là một biên dao động do sự truyền của sóng trong miền tính toán và cần phải có kỹ thuật tính toán đặc biệt để xử lý loại biên này một cách phù hợp.

Nhằm giải quyết vấn đề thứ nhất, hầu hết mô hình sóng vỡ hiện nay không bao gồm lớp biên đáy trong miền tính toán. Trong trường hợp không xét đến lớp biên đáy, có thể sử dụng một hệ thống điểm lưới phân bố đều cho vùng ngoài lớp biên đáy với số lượng điểm lưới không quá lớn. Lúc này, việc áp dụng trực tiếp điều kiện vận tốc bằng không tại biên đáy là không hợp lý vì sẽ làm sai lệch vận tốc tính toán cho vùng trên lớp biên đáy. Tuy nhiên, đối với sóng vỡ, nếu không sử dụng điều kiện vận tốc bằng không tại đáy thì kết quả số của mô hình sẽ không chính xác, đặc biệt đối với phân bố thẳng đứng của vận tốc ngang. Vì vậy, cần thiết phải bao gồm cả lớp biên đáy trong miền tính toán của một mô hình sóng vỡ. Để thực hiện điều này, cần thiết lập một hệ thống điểm lưới không đều cho miền tính toán nhằm thu được độ phân giải cao trong vùng lân cận đáy biển. Sự bao gồm lớp biên đáy trong mô hình sóng còn giúp thu thập được những tham số động lực của lớp biên đáy như: độ nhám đáy, ứng suất tiếp đáy; đây là những số liệu quan trọng cho việc nghiên cứu bài toán chuyển tải bùn cát ở vùng ven biển. Trong vùng sóng vỡ, sự phát triển trong nghiên cứu lớp biên đáy vẫn còn hạn chế vì ba nguyên nhân chính sau, (1) Ảnh hưởng của rối tạo nên do sự vỡ sóng lên cấu trúc rối của lớp biên đáy vẫn chưa được am hiểu đầy đủ. Việc mô phỏng quá trình lan truyền rối từ miền phía trên xuống miền gần đáy cũng như sự trao đổi động năng rối giữa miền bên trên và lớp biên đáy vẫn là bài toán không thể giải cho đến nay; (2) Vận tốc đường

dòng tự do tại đỉnh của lớp biên đáy, một điều kiện biên quan trọng để giải dòng chảy trong lớp biên đáy, vẫn không thể xác định chính xác bởi các mô hình sóng hiện có; và (3) Sự hạn chế số liệu đo đạc vận tốc đáng tin cậy có thể dùng để kiểm chứng một mô hình lớp biên đáy cho vùng sóng vỡ.

Duy và các cộng sự (1998) áp dụng mô hình sóng vỡ của Duy và Shibayama (1997) để xác định các vectơ vận tốc tại đỉnh của lớp biên đáy. Các vận tốc này sau đó được sử dụng như một trong các điều kiện biên để giải phương trình dòng chảy cho lớp biên đáy. Một phiên bản cải tiến của mô hình lớp biên đáy nêu trên được giới thiệu bởi Duy và các cộng sự (2000), trong đó một lời giải thống nhất được thiết lập cho chuyển động trong lớp biên đáy và miền bên trên.

Bên cạnh vấn đề làm thế nào để xử lý lớp biên đáy một cách hợp lý, biên phía bờ biển là một vấn đề phức tạp khác khi xây dựng một mô hình sóng. Hiện tượng khô và ướt luân phiên của bờ biển do sự leo và rút của sóng trong miền sóng leo vẫn chưa thể được mô phỏng một cách hợp lý bởi các lý thuyết động lực học chất lỏng hiện hữu. Hiện nay, để đơn giản, hầu hết mô hình sóng dùng biên phía bờ là một chiều sâu nước cực tiểu không đổi vì loại biên này ảnh hưởng không lớn đến các quá trình trong vùng sóng vỡ. Việc sử dụng một chiều sâu nước cực tiểu không đổi tại biên phía bờ có thể cung cấp sự mô phỏng tốt các đại lượng sóng trong vùng sóng vỡ, tuy nhiên nó lại là trở ngại lớn trong việc mô phỏng các quá trình gần đường bờ bởi vì giới hạn lời giải của mô hình đến một chiều sâu nước hữu hạn. Để có thể mô phỏng được sự biến dạng bờ dọc theo bờ biển, các đặc trưng thủy động của chuyển động trong vùng sóng leo cần phải được xác định và vì vậy, một mô hình sóng trong đó cho phép sóng truyền qua đường bờ ở mực nước tĩnh và đi vào vùng sóng leo là rất cần thiết. Cho đến nay, đã có nhiều nổ lực nhằm bao gồm miền sóng leo vào mô hình sóng. Để xử lý một đường bờ di động, cần sử dụng các giả thiết hay đơn giản hóa nhất định. Hibbert và Peregrin (1979) xử lý biên di động này bằng cách định nghĩa ranh giới của đường bờ bị ướt là vị trí ở đó chiều sâu nước tổng cộng nhỏ hơn một chiều sâu nước nhỏ tới hạn cho trước. Asano (1994) sử dụng cùng một khái niệm như trên khi giải phương trình nước nông hai chiều cho một vùng sóng leo có sóng tới xiên góc với bờ. Tao (1984) giới thiệu các kênh hẹp nhân tạo hay các dải nằm trong bờ mà trong đó sóng có thể tiếp tục truyền sau khi đi qua đường bờ ở mực nước tĩnh.

Nghiên cứu này sẽ đề nghị cách thiết lập và giải một mô hình số cho sóng vỡ trên đáy biển có độ dốc đều. Mô hình được giải cho một trường sóng hai chiều trong mặt phẳng thẳng đứng. Miền tính toán của mô hình, như trình bày trong hình 1, bao gồm toàn bộ vùng nước nông: vùng trước sóng vỡ, vùng sóng vỡ, lớp biên đáy và vùng sóng leo.

2. THIẾT LẬP MÔ HÌNH

Khi thiết lập mô hình này đã sử dụng hệ phương trình chủ đạo tương tự mô hình của Shibayama và Duy (1994). Tuy nhiên, điểm khác biệt cơ bản là trong mô hình này bao gồm cả lớp biên đáy và vùng sóng leo. Các cải tiến này cho phép mô hình có thể xử lý điều kiện biên ở đáy và ở phía bờ biển một cách hiệu quả hơn. Đồng thời, thuật toán xây dựng hệ thống điểm lưới cho miền tính toán cũng được cải tiến để đạt được độ phân giải cao cho các quá trình thủy động lực trong khu vực gần đáy biển.

2.1 Các phương trình chủ đạo

Đối với miền có mặt thoáng tự do, các đặc trưng rối trung bình đồng pha của chuyển động chất lỏng sau khi sóng vỡ được mô phỏng bởi hệ phương trình Reynolds tổng quát dạng tensor như sau:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j}\overline{u_i' u_j'} \tag{2}$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}\int_{z_b}^{\zeta} u_i dz = 0 \tag{3}$$

trong đó u_i: vận tốc trung bình đồng pha theo chiều x_i, P: áp suất đồng pha, ζ: cao trình mặt nước trung bình đồng pha, z_b: cao trình đáy, f_i:

lực khối theo chiều x_i, u_i': vận tốc nhiễu động theo chiều x_i.

Trong pt. (2), tương quan $\overline{u_i'u_i'}$ giữa các vận tốc nhiễu động khi được nhân với tỉ trọng ρ, sẽ biểu diễn về mặt vật lý sự chuyển tải động lượng do chuyển động rối gây ra. Ứng dụng khái niệm về hệ số nhớt rối của Boussinesq, tương quan này có thể biểu diễn theo các gradient vận tốc trung bình đồng pha như sau:

$$-\overline{u_i'u_j'} = \nu_T\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \tag{4}$$

trong đó ν_T là hệ số nhớt rối, đây là một tham số quan trọng trong mô phỏng dòng chảy rối.

Trong mặt phẳng thẳng đứng 2 chiều (2-DV), hệ phương trình Reynolds tổng quát từ (1) đến (4) có thể viết dưới dạng 2 biến vô hướng như sau:

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \tag{5}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{\partial\left(u^2\right)}{\partial x}+\frac{\partial(uw)}{\partial z}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x}+ 2\frac{\partial}{\partial x}\left(\nu_T\frac{\partial u}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left[\nu_T\left(\frac{\partial u}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial x}\right)\right] \tag{6}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t}+\frac{\partial(uw)}{\partial x}+\frac{\partial\left(w^2\right)}{\partial z}=-g-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial z}+ 2\frac{\partial}{\partial z}\left(\nu_T\frac{\partial w}{\partial z}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left[\nu_T\left(\frac{\partial u}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial x}\right)\right] \tag{7}$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\int_{z_b}^{\zeta} u dz=0 \tag{8}$$

Trong các phương trình nêu trên, các số hạng liên quan đến khuếch tán phân tử đã được loại bỏ vì trong chuyển động rối, hệ số nhớt phân tử rất nhỏ so với hệ số nhớt rối.

2.2 Các điều kiện biên

Trong mặt phẳng thẳng đứng 2 chiều, các điều kiện biên bao gồm:

- Biên mặt nước ($z = \zeta$).

Mặt nước là một biên dao động trong mô hình. Ở mỗi thời điểm tính toán, vị trí của biên này được xác định dựa trên bản thân các điều kiện biên của mặt nước như sau:

Đối với vận tốc ngang u, giả thiết tồn tại điều kiện ứng suất cắt bằng 0 tại mặt nước:

$$\frac{\partial u}{\partial z}=0 \tag{9}$$

Điều kiện biên động học ở mặt thoáng tự do được áp dụng cho vận tốc thẳng đứng w:

$$w=\frac{\partial \zeta}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x} \tag{10}$$

và điều kiện biên đối với áp suất P là:

$$P=0 \tag{11}$$

- Biên đáy biển ($z = z_b$).

Bên trong lớp biên đáy của miền tính toán, có thể áp dụng điều kiện biên vận tốc bằng không dọc theo đáy biển:

$$u=0 \tag{12}$$

$$w=0 \tag{13}$$

Sử dụng phương trình bảo toàn khối lượng (1) và điều kiện biên ở đáy, ta thu được điều kiện biên dạng Neumann cho áp suất từ phương trình động lượng theo phương z, (3):

$$\frac{\partial P}{\partial z}=\rho\left(-g+2\nu_T\frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right) \tag{14}$$

- Biên phía biển ($x = 0$).

Các điều kiện biên của sóng tới tại biên phía biển được xác định bằng cách ứng dụng lý thuyết sóng cnoidal hay sóng Stokes, tùy thuộc vào giá trị tính toán của tham số Ursell U_r tại biên này (Nishimura et al., 1977).

$$U_r=\frac{HL^2}{h^3}\quad\begin{cases}\geq 25: cnoidal\ waves\\ <25: Stokes\ waves\end{cases} \tag{15}$$

với H: chiều cao sóng tới; L: chiều dài sóng tới; h: chiều sâu nước.

Các sóng phản xạ từ phía trong miền tính toán, nếu có, được xử lý truyền tự do qua biên hở phía biển.

- Biên phía bờ ($x = x_{max}$)

Như đã nêu, trong mô hình này sóng có thể truyền qua vùng sóng leo gần đường bờ. Để thực hiện điều này, một lớp nước rất mỏng được giả thiết hiện hữu thường xuyên trong vùng sóng leo để duy trì sự ổn định của lời giải số. Chiều dày của lớp nước này phải đủ nhỏ, chẳng hạn khoảng vài mm, để không ảnh hưởng đến lời giải số. Biên phía bờ được đặt cách đường bờ ở mực nước tĩnh đủ xa nhằm không ảnh hưởng đến chuyển động của chất lỏng trong vùng sóng leo. Ngay tại biên

này, giả thiết tồn tại một trạng thái tĩnh, nghĩa là các thành phần vận tốc bằng không và áp suất phân bố theo quy luật thủy tĩnh.

- Vị trí vỡ sóng ($x = x_b$)

Vị trí sóng vỡ được xác định từ công thức Goda (1975):

$$\frac{H_b}{L_0} = A\left\{1 - \exp\left[-1.5\frac{\pi h_b}{L_0}\left(1 + 15s^{4/3}\right)\right]\right\} \quad (16)$$

trong đó H_b: chiều cao sóng vỡ; L_0: chiều dài sóng nước sâu; s: độ dốc đáy; A = 0,17 (hằng số thực nghiệm).

2.3 Phương pháp tạo lưới sai phân

Hiện nay, lời giải số của hầu hết mô hình sóng đều dựa trên hệ thống điểm lưới đều, có nghĩa là khoảng cách các điểm nút không đổi theo mỗi phương. Đối với các mô hình số có hệ thống điểm lưới đều, gần như không thể đạt được độ phân giải cao tại mọi nơi trong miền tính toán vì khối lượng lẫn thời gian tính toán sẽ vô cùng lớn nếu sử dụng một hệ thống điểm lưới rất mịn cho toàn bộ miền tính toán. Nhằm giải quyết khó khăn nêu trên, trong mô hình này đã áp dụng một thuật toán đặc biệt để tạo nên một hệ thống điểm lưới không đều, trong đó khoảng cách các điểm lưới là rất nhỏ trong khu vực gần đáy biển và thưa hơn trong vùng trên lớp biên đáy. Nhờ vậy, mô hình vẫn có thể mô phỏng được gradient vận tốc rất lớn trong lớp biên đáy mà không chiếm quá nhiều bộ nhớ máy tính cũng như không tốn nhiều thời gian tính toán.

Ở mỗi thời điểm tính toán, một kỹ thuật biến hình được áp dụng để biến đổi miền vật lý (x,z,t) thành miền tính toán (ξ,η,τ), trong đó các hàm biến đổi được biểu diễn như sau:

$$x = \xi \quad (17)$$

$$z = z_b + f(\eta^*)(\zeta - z_b) \quad (18)$$

$$t = \tau \quad (19)$$

với:

$$\eta^* = \frac{\eta_{i,j} - \eta_{\min}}{\eta_{\max} - \eta_{\min}} = \frac{\eta_{i,j} - \eta_{\min}}{\Delta_\eta} \quad (20)$$

Tùy theo dạng của hàm $f(\eta^*)$, có thể tạo nên các loại điểm lưới không đều khác nhau trong miền vật lý. Nhằm tạo nên lưới sai phân với khoảng cách điểm lưới thay đổi theo phương đứng, hàm $f(\eta^*)$ được chọn như sau (Fletcher, 1991):

$$f(\eta^*) = P\eta^* + (1-P)\left\{1 - \frac{\tanh\left[Q(1-\eta^*)\right]}{\tanh Q}\right\} \quad (21)$$

với P và Q là các tham số điều khiển hình dạng hệ thống điểm lưới. Theo phương thẳng đứng, để thu nhỏ khoảng cách các điểm lưới trong vùng gần đáy biển và kéo dãn khoảng cách này trong vùng phía trên, giá trị của P và Q có thể lấy như sau:

$$P = 0.1 \quad (22)$$

$$Q = 4.0 \quad (23)$$

Sử dụng các phương trình (21) đến (23), hệ thống điểm lưới không đều theo phương đứng được thiết lập và trình bày trong hình 1.

Các đạo hàm bậc nhất của các thành phần vận tốc theo các biến độc lập ξ,η,τ được xác định theo quan hệ:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial z} & \frac{\partial u}{\partial t} \\ \frac{\partial w}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial z} & \frac{\partial w}{\partial t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial \xi} & \frac{\partial u}{\partial \eta} & \frac{\partial u}{\partial \tau} \\ \frac{\partial w}{\partial \xi} & \frac{\partial w}{\partial \eta} & \frac{\partial w}{\partial \tau} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \xi}{\partial x} & \frac{\partial \xi}{\partial z} & \frac{\partial \xi}{\partial t} \\ \frac{\partial \eta}{\partial x} & \frac{\partial \eta}{\partial z} & \frac{\partial \eta}{\partial t} \\ \frac{\partial \tau}{\partial x} & \frac{\partial \tau}{\partial z} & \frac{\partial \tau}{\partial t} \end{bmatrix} \quad (24)$$

Các phần tử của ma trận Jacobian $\boldsymbol{J}$, ma trận thứ nhì ở vế phải của (24), được xây dựng dựa trên biểu thức đạo hàm:

$$\frac{\partial F}{\partial x_i} = \frac{\partial F}{\partial \xi}\frac{\partial \xi}{\partial x_i} + \frac{\partial F}{\partial \eta}\frac{\partial \eta}{\partial x_i} + \frac{\partial F}{\partial \tau}\frac{\partial \tau}{\partial x_i} \quad (25)$$

Áp dụng các phương trình (24) và (25), hệ phương trình chủ đạo và các điều kiện biên trong miền (x,z,t) có thể biến đổi sang miền (ξ,η,τ), miền có các biên song song với các trục tọa độ ξ và η.

Trong lưới sai phân, 40 điểm nút được thiết lập dọc theo phương đứng. Từ các phương trình (21) - (23), khoảng 15-20 điểm nút sẽ được tạo ra tự động trong vùng gần đáy. Khoảng cách thẳng đứng giữa các điểm nút thay đổi từ 0.5mm đến 1mm trong vùng gần đáy và từ 2mm đến 20mm trong vùng phía trên.

2.4 Xác định hệ số nhớt rối

Việc xác định hệ số nhớt rối là một trong nhiều bước của quá trình tính toán của mô hình số.

Trong vùng gần đáy, hai lời giải khác nhau của hệ số nhớt rối đã được thử nghiệm trong mô hình. Lời giải thứ nhất dựa trên phương trình chuyển tải động năng rối, tức phương trình *k*:

$$\frac{\partial k}{\partial t}+\frac{\partial(uk)}{\partial x}+\frac{\partial(wk)}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\nu_T}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\nu_T}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial z}\right)+\frac{PROD}{\rho}-c_2\frac{k^{3/2}}{l_d} \quad (26)$$

$$\nu_T = l_d\sqrt{k} \quad (27)$$

$$l_d = \kappa\sqrt[4]{c_2}z' \quad (28)$$

trong đó *PROD* : nguồn tạo rối, c_2 : một hằng số, l_d : tỉ lệ dài của chuyển động rối, κ : hằng số Karman, *z'* : khoảng cách thẳng đứng kể từ đáy.

Trong nghiên cứu này, giả thiết rằng sự truyền của rối do sóng vỡ gây ra từ vùng phía trên xuống lớp biên đáy là có thể bỏ qua, nghĩa là các xoáy cuộn hình thành trong quá trình vỡ sóng hầu hết bị tiêu tán năng lượng trong vùng phía trên trước khi đến được lớp biên đáy. Nếu không có sự trao đổi rối từ vùng phía trên, nguồn tạo rối trong lớp biên đáy có thể xác định theo:

$$PROD = \rho\nu_T\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 \quad (29)$$

Lời giải thứ nhì của hệ số nhớt rối được dựa trên các phương trình chuyển tải động năng rối và tiêu tán năng lượng rối, tức là phương trình k-ε :

$$\frac{\partial k}{\partial t}+\frac{\partial(uk)}{\partial x}+\frac{\partial(wk)}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\nu_T}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\nu_T}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial z}\right)+\nu_T\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2-\varepsilon \quad (30)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}+\frac{\partial(u\varepsilon)}{\partial x}+\frac{\partial(w\varepsilon)}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial z}\right)+c_{1\varepsilon}\frac{\nu_T}{k}\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2-c_{2\varepsilon}\frac{\varepsilon^2}{k} \quad (31)$$

$$\nu_T = c_\mu\frac{k^2}{\varepsilon} \quad (32)$$

trong đó σ_k, σ_ε, $c_{1\varepsilon}$, $c_{2\varepsilon}$, và c_μ là các hằng số thực nghiệm với giá trị lấy theo Rodi (1980).

Các điều kiện biên của phương trình k và k-ε là:

$$k=\frac{1}{\sqrt{c_2}}\nu_T\frac{\partial u}{\partial z} \quad khi \quad z=\frac{k_N}{30} \quad (33)$$

$$\frac{\partial k}{\partial z}=0 \quad khi \quad z=z'_e \quad (34)$$

$$\varepsilon=(c_2)^{3/4}\frac{k^{3/2}}{\kappa z} \quad khi \quad z=\frac{k_N}{30} \quad (35)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial z}=0 \quad khi \quad z=z'_e \quad (36)$$

trong đó k_N : độ nhám đáy, z'_e : khoảng cách thẳng đứng kể từ đáy của điểm nút thứ 20 (tổng cộng có 40 điểm nút dọc theo chiều sâu với 20 điểm được tạo trong vùng gần đáy và số còn lại cho miền phía trên). Một cách định lượng, với tỉ lệ phòng thí nghiệm, z'_e thay đổi từ *1cm* đến *2cm* dọc theo đáy biển.

Ở các biên phía biển và phía bờ, giả thiết rằng k và ε phân bố đều theo phương x cho cả phương trình k và phương trình k-ε .

Các phương trình nêu trên và điều kiện biên tương ứng cũng được biến đổi từ miền *(x, z, t)* sang miền (ξ,η,τ) và sẽ được giải đồng thời với các phương trình chủ đạo thủy động lực.

Trong miền trên lớp biên đáy của vùng sóng vỡ, giá trị trung bình $\overline{\nu}_T$ (trung bình thời gian trong 1 chu kỳ sóng) của ν_T thông thường được xác định bằng cách gán các giá trị vận tốc dòng chảy tính toán với số liệu đo đạc. Chẳng hạn, Longuet-Higgins (1970) mô phỏng dòng chảy dọc bờ bằng cácch sử dụng:

$$\overline{\nu}_T \approx 0.01h\frac{\sqrt{gh}}{s} \quad (37)$$

trong đó h: chiều sâu nước trung bình, s: độ dốc dọc đáy biển.

Mặt khác, khi mô phỏng dòng chảy vuông góc với bờ, Okayasu và các cộng sự (1988) thiết lập một công thức cho hệ số nhớt rối trung bình như sau:

$$\overline{\nu}_T = 0.3\sqrt{g(d_t+H)}sz' \quad (38)$$

trong đó d_t : chiều sâu tính đến chân sóng, H: chiều cao sóng, z': khoảng cách thẳng đứng tính từ đáy.

Svendsen và Hansen (1988) cũng đề nghị biểu thức hệ số nhớt rối trung bình sau để nghiên cứu dòng chảy vuông góc bờ:

$$\overline{\nu}_T = (0.007 - 0.03)h\sqrt{gh} \qquad (39)$$

Dựa vào các biểu thức của hệ số nhớt rối trung bình nêu trên, Shibayama và Duy (1994) thiết lập một biểu thức hệ số nhớt rối phụ thuộc thời gian cho miền ngoài lớp biên đáy của vùng sóng vỡ như sau:

$$\nu_T = f_\nu \sqrt{gh}(\zeta - z_b) \qquad (40)$$

f_ν là một hệ số thực nghiệm có giá trị trung bình bằng 0,1 dựa trên các kết quả mô phỏng sóng vỡ (Duy và Shibayama, 1997).

3. LỜI GIẢI SỐ CỦA MÔ HÌNH

Hệ phương trình biến đổi và các điều kiện biên được giải bằng phương pháp sai phân hữu hạn. Ở mỗi thời điểm, việc tính toán bao gồm các bước sau:

(1) *Bước 1*: Ước tính cao trình mặt nước

Cao trình mặt nước ở đầu thời đoạn *n* có thể ước tính bằng cách áp dụng sơ đồ sai phân hiện cho phương trình (8), trong đó sử dụng các giá trị vận tốc thu được ở cuối thời đoạn *n-1*.

(2) *Bước 2*: Tính toán hệ số nhớt rối

Dựa trên dạng biến đổi của các phương trình (26), (30), (31) và (40), phân bố hệ số nhớt rối được giải cho toàn miền tính toán.

(3) *Bước 3*: Tính toán trường áp suất

Dạng sai phân với độ chính xác bậc 2 của các phương trình (5), (6) và (7) dẫn đến một hệ phương trình tuyến tính theo áp suất cho tất cả điểm nút nằm trong miền tính toán. Đối với các nút nằm trên các biên, dạng sai phân của các điều kiện biên tương ứng cũng tạo nên các phương trình tuyến tính theo áp suất cho các nút biên. Lời giải của toàn bộ hệ các phương trình theo áp suất nêu trên sẽ cung cấp giá trị áp suất tại tất cả điểm nút của miền tính toán.

(4) *Bước 4*: Tính toán trường vận tốc

Sử dụng trường áp suất nhận được từ *Bước 3* để xác định trường vận tốc từ các phương trình bảo toàn động lượng (6) và (7). Vận tốc tại các nút dọc theo các biên cũng được xác định bằng cách giải các phương trình điều kiện biên của vận tốc.

(5) *Bước 5*: Tính toán cao trình mặt nước

Giá trị cao trình mặt nước ước tính trong *Bước 1* được cải thiện bằng cách áp dụng sơ đồ sai phân dạng Crank-Nicolson cho phương trình (8), sử dụng trường vận tốc ở cả hai thời điểm *n-1* và *n*.

Khoảng cách các điểm nút theo phương *x*, Δx, được chọn như sau:

$$\Delta x = \frac{L}{100} \sim \frac{L}{50} \qquad (41)$$

Ở mỗi vị trí trong miền tính toán, khoảng cách các điểm nút theo phương *z*, Δz, thay đổi do kỹ thuật tạo lưới nêu trong mục 2.3: Δz thay đổi từ 0.5mm đến 1mm trong vùng gần đáy và từ 2mm đến 20mm trong vùng phía trên.

Thời đoạn tính toán, Δt, được xác định như sau:

$$\Delta t = \frac{T}{200} \sim \frac{T}{100} \qquad (42)$$

Thời gian tính toán cần thiết để đạt được lời giải ổn định và hội tụ của mô hình số phụ thuộc vào số lượng điểm nút tạo nên trong miền tính toán và khả năng của máy tính. Ví dụ, nếu sử dụng HP9000/720 - 17.2 Mflops, cần khoảng 60 phút để hoàn tất một lần mô phỏng cho một hệ thống lưới gồm 8000 điểm nút.

4. KẾT QUẢ CỦA MÔ HÌNH

Các kết quả sau đây của lời giải số được trình bày trong mục này: (1) trường vận tốc trong vùng sóng vỡ đối với miền trên lớp biên đáy và trong lớp biên đáy, (2) phân bố động năng rối và tiêu hao năng lượng rối trong lớp biên đáy, (3) biến thiên theo thời gian của mặt nước, áp suất, vận tốc theo phương ngang và phương đứng tại các điểm khác nhau trong vùng sóng vỡ đối với miền trên lớp biên đáy và trong lớp biên đáy, (4) phân bố vận tốc ngang theo phương thẳng đứng trong lớp biên đáy, (5) toàn bộ trường sóng từ biên phía biển đến biên phía bờ, (6) dao động sóng trong vùng sóng leo, (7) dao động theo thời gian của mặt nước tại các vị trí trong vùng sóng leo.

Kết quả số được kiểm chứng bằng cách so sánh với 3 tập hợp số liệu thí nghiệm được đánh số TH1, TH2 và TH3. Chi tiết của mỗi thí nghiệm được mô tả dưới đây.

TH1 (Cox và các cộng sự, 1996): trong thí nghiệm này, phân bố vận tốc được đo tại các vị trí khác nhau trong vùng sóng vỡ bằng máy đo vận tốc loại

laser-Doppler. Tại mỗi mặt cắt đo, 30 điểm đo được bố trí dọc theo chiều đứng, trong đó có 10 điểm nằm sát đáy. Chu kỳ sóng là 2,2 s, chiều sâu nước lớn nhất là 0,4 m và chiều cao sóng tại điểm vỡ sóng là 17,10 cm. Đáy có độ dốc 1:35 và được phủ cát tự nhiên có đường kính trung bình 1,0 mm.

TH2 (Okayasu và các cộng sự, 1988): việc bố trí thí nghiệm trong TH2 tương tự TH1 nhưng các điểm đo hầu hết nằm ngoài lớp biên đáy. Cao trình mặt nước, vận tốc ngang, vận tốc đứng được đo tại các vị trí khác nhau trong vùng sóng vỡ. Chu kỳ sóng là 2,0 s, chiều sâu nước lớn nhất là 0,4 m, chiều cao sóng tới là 8,5 cm, độ dốc đáy là 1:20.

TH3 (Michi, 1982): trong thí nghiệm này, cao trình mặt nước được đo đồng thời bằng nhiều thước đo bố trí trong vùng sóng leo. Độ dốc đáy là 1:30. Chu kỳ sóng là 1,52 s, chiều sâu nước lớn nhất là 0,405 m, chiều cao sóng tới là 4,94 cm.

Hình 2 trình bày trường vận tốc tính toán bởi mô hình, trong đó vận tốc trong vùng ngoài và trong lớp biên đáy được vẽ thành từng cặp. Tại mỗi vị trí, có thể thấy rằng biên phía trên của lớp biên đáy thay đổi theo thời gian, tương ứng với cao trình mặt thoáng tự do. Giá trị trung bình của chiều dày lớp biên đáy trong trường hợp tính này là *10mm*, một giá trị thông thường của lớp biên đáy trong chuyển động sóng đối với tỉ lệ trong phòng thí nghiệm.

Sự lệch pha giữa chuyển động sóng trên mặt nước và sự phát triển và phân bố động năng rối (TKE) trong lớp biên đáy được trình bày trong hình 3, trong đó TKE được xác định bằng cách giải phương trình k. Ở mỗi pha của chu kỳ sóng, có thể quan sát trong lớp biên đáy các lõi phát triển của TKE xuất phát từ đáy biển và di chuyển cùng với các đỉnh sóng trên mặt thoáng. Hiện tượng này có thể được giải thích như là một kết quả của số hạng tạo rối trong phương trình k. Dưới các đỉnh sóng, hình 3 cho thấy cường độ của các vectơ vận tốc hướng bờ là rất lớn và do đó gây ra gradient vận tốc rất lớn trong lớp biên đáy. Từ (29), rõ ràng nguồn tạo rối trong lớp biên đáy cũng lớn và gây ra giá trị TKE lớn. Tuy nhiên, dưới các chân sóng, các vectơ vận tốc hướng biển có cường độ nhỏ và gần như phân bố đều theo chiều sâu, vì vậy gradient vận tốc hay nguồn tạo rối trong lớp biên đáy cũng nhỏ. Cũng từ hình 3, có thể thấy rằng khi sóng truyền về phía bờ và giảm dần chiều cao, cường độ của TKE cũng giảm dần. Cường độ TKE tính toán trong lớp biên đáy biến đổi theo tỉ lệ 10^1 cm^2/s^2, rất gần với các giá trị của TKE được Cox và các cộng sự (1996) trình bày trong báo cáo kết quả thí nghiệm (TH1). Sự tương đồng này khẳng định sự hợp lý của giả thiết đã nêu trong mục 2.4 trên đây, đó là sự truyền rối tạo bởi sóng vỡ từ vùng phía trên đến lớp biên đáy là có thể bỏ qua trong trường hợp sóng vỡ dạng bọt hay sóng vỡ bổ nhào yếu.

Lời giải của phương trình k-ε cũng cung cấp hầu như cùng sự hình thành và phân bố của TKE trong lớp biên đáy giống như phương trình k (Hình 4). Từ lời giải của phương trình k-ε cũng thu được phân bố của tiêu tán năng lượng rối như biểu diễn trong Hình 5. Tương tự phân bố của TKE, sự tiêu tán lớn năng lượng rối cũng tập trung trong vùng lân cận đáy và tương ứng với vị trí đỉnh sóng trên mặt thoáng. Điều này có nghĩa là năng lượng rối bị tiêu tán nhiều ở các khu vực có động năng rối lớn. Sự tiêu tán năng lượng rối dần dần giảm khi sóng truyền xa khỏi điểm sóng vỡ.

Cao độ mặt nước và vận tốc ngang thu được từ lời giải số được so sánh với số liệu thí nghiệm (TH1) như trong Hình 6a và 6b. Trong hình 6a, các so sánh được thực hiện cho mặt cắt nằm trong vùng chuyển tiếp ($X/X_b=0.84$), trong đó biến X chỉ khoảng cách nằm ngang từ mặt cắt đến đường bờ ở mực nước tĩnh, ký tự "b" chỉ điểm sóng vỡ, và z' là khoảng cách thẳng đứng tính từ đáy như đã định nghĩa. Hình 6b trình bày các so sánh cho mặt cắt nằm ở khoảng giữa vùng sóng vỡ ($X/X_b=0.68$). Trong vùng chuyển tiếp, có thể quan sát thấy một độ lệch pha nhỏ giữa dao động mặt nước mô phỏng và thí nghiệm. Giai đoạn hạ của mực nước đo xảy ra nhanh hơn mực nước tính toán. Tuy nhiên, trong khoảng giữa vùng sóng vỡ mực nước tính toán và thí nghiệm rất tương đồng với nhau. Ở các cao độ khác nhau trong lớp biên đáy ($z'=1.5mm, 2.5mm, 4mm, 6mm$), có thể thấy rằng mô hình số dự báo tốt sự biến thiên theo thời gian của vận tốc ngang, trong đó đường liền nét và đứt nét biểu diễn theo thứ tự các giá trị vận tốc tính toán được từ các cấu trúc rối giải được từ phương trình k và phương trình k-ε. Hai biến thiên vận tốc này không khác nhau nhiều mặc dù phương trình k cho kết quả mô phỏng hơi tốt hơn một ít. Ở các cao độ khác nhau trong miền phía

trên lớp biên đáy (*z'=4cm, 8cm, 10cm, 12cm*), các so sánh cho thấy kết quả tính toán vận tốc ngang khá phù hợp với số liệu thí nghiệm đối với các vị trí nằm trong vùng chuyển tiếp. Tuy nhiên, ở sâu trong vùng sóng vỡ, các giá trị cực đại của vận tốc ngang thu được từ lời giải số hơi lớn hơn số liệu đo đạc.

Ứng suất tiếp đáy, một lực quan trọng gây ra chuyển động của bùn cát, phụ thuộc chủ yếu vào gradient vận tốc trong vùng gần đáy biển. Vì vậy, việc dự báo chính xác phân bố vận tốc ngang theo phương đứng trong vùng gần đáy là rất cần thiết đối với vấn đề giải các bài toán bùn cát. Hình 7 trình bày các so sánh (TH1) giữa giá trị tính toán và giá trị đo của phân bố vận tốc trong lớp biên đáy cho một vị trí nằm giữa vùng sóng vỡ ($X/X_b=0.51$). Trong hình này, phân bố theo phương đứng của vận tốc ngang được biểu diễn cho các pha khác nhau trong một chu kỳ sóng. Do ảnh hưởng của các đặc trưng phi tuyến và bất đối xứng cao của dao động mặt nước và vận tốc trong vùng sóng vỡ, cường độ của dòng chảy hướng bờ lớn hơn dòng chảy hướng biển. Ở các pha xuất hiện dòng chảy hướng biển trong lớp biên đáy (*t/T=0.44, 0.55, 0.66*), mô hình số dự báo hợp lý phân bố vận tốc trong vùng gần đáy. Tuy nhiên, ở pha *t/T=0.77* khi dòng chảy hướng biển trong lớp biên đáy đạt giá trị cực đại, mô hình không thể dự báo chính xác vận tốc tại các cao độ rất sát với đáy biển (*z' < 2mm*). Khi dòng chảy trong lớp biên đáy đổi hướng về phía bờ, lời giải số cho giá trị vận tốc nhỏ hơn số liệu đo đối với các cao độ *z' < 1.5mm* và cho giá trị vận tốc lớn hơn số liệu đo đối với các cao độ *z' > 5mm*. Phân bố vận tốc tính toán là khá tương tự đối với các cấu trúc rối giải từ phương trình *k* (đường nét liền) và từ phương trình k-ε (đường nét đứt). Tuy nhiên, phương trình *k* cung cấp phân bố vận tốc gần hơn với số liệu thí nghiệm.

Các hình 8a và 8b trình bày chi tiết kết quả mô phỏng và kiểm chứng mô hình cho các tham số sóng của vùng trên lớp biên đáy (TH2), trong đó biến thiên theo thời gian của tất cả tham số sóng (cao độ mặt nước ζ, áp suất tổng *P*, vận tốc ngang *u*, vận tốc đứng *w*) được biểu diễn cho các vị trí khác nhau trong vùng sóng vỡ. Tại điểm sóng vỡ ($X/X_b=1$), mô hình dự báo giá trị cực đại của mặt nước hơi nhỏ hơn số liệu đo, tuy nhiên nhìn chung có sự tương đồng hợp lý giữa lời giải số và các số liệu thí nghiệm. Biến thiên theo thời gian của cả vận tốc ngang và đứng tại các cao độ khác nhau (*z'/h=0.15, 0.74*) được mô hình dự báo tốt. Tuy nhiên, tại cao độ gần mặt nước (*z'/h=0.74*), mô hình cho kết quả về giá trị cực đại của vận tốc đứng nhỏ hơn số liệu đo. Biến thiên theo thời gian của các tham số sóng cũng cho thấy tồn tại một độ lệch pha nhỏ giữa vận tốc ngang và vận tốc đứng, còn mực nước, áp suất tổng và vận tốc ngang biến thiên gần như đồng pha với nhau. Ngoài ra, biến thiên của áp suất và mực nước có dạng hoàn toàn tương tự nhau. Tại vị trí ở khoảng giữa vùng sóng vỡ ($X/X_b=0.57$), mực nước và vận tốc đứng ở các cao độ khác nhau (*z'/h=0.26, 0.64*) được dự báo tốt bởi mô hình, còn vận tốc ngang tính toán thì lớn hơn số liệu thí nghiệm.

Như đã nêu, ngoài lớp biên đáy và miền phía trên thuộc vùng sóng vỡ, miền tính toán của mô hình cũng bao gồm cả vùng sóng leo. Trong lời giải số, sóng truyền qua đường bờ ở mực nước tĩnh có thể tiếp tục leo lên mái dốc bờ biển để truyền đến điểm có cao độ lớn nhất. Một hình ảnh tổng thể về toàn bộ trường sóng tính toán bởi mô hình được trình bày trong Hình 9 cho các pha khác nhau của một chu kỳ sóng (TH3). Trường sóng trong hình bao gồm vùng trước sóng vỡ, vùng sóng vỡ và vùng sóng leo. Trong trường hợp tính toán này, điểm sóng vỡ nằm tại *x = 1007 cm* và đường bờ ứng với mực nước tĩnh tại *x = 1260 cm*.

Cao độ mặt nước và trường vận tốc của sóng leo và sóng rút trong vùng sóng leo được thể hiện trong Hình 10 cho các pha khác nhau của chu kỳ sóng. Sau khi truyền qua đường bờ ứng với mực nước tĩnh, sóng đổ sụp và mặt sóng bắt đầu leo lên vùng bờ khô cho đến khi tới vị trí cao nhất trên mái dốc (*x=1308cm*). Cho đến thời điểm này (*t/T=0.375*), các vectơ vận tốc vẫn hướng theo chiều chuyển động của mặt sóng (về phía bờ). Sau đó sóng bắt đầu rút xuống, từ thời điểm này các vectơ vận tốc đổi hướng ngược lại và mặt sóng trượt xuống dọc mái dốc cho đến khi tới vị trí đường bờ ở mực nước tĩnh, nơi đây một sóng khác lại tiếp tục tiến vào vùng sóng leo (*t/T=0.875*).

Hình 11 trình bày các so sánh giữa biến thiên mực nước theo tính toán và mực nước theo thí nghiệm cho các vị trí khác nhau trong vùng sóng leo. Trong hình này, biến "x" chỉ khoảng cách từ điểm đang xét đến đường bờ ở mực nước tĩnh và

"z'" là khoảng cách thẳng đứng đến mực nước tĩnh. Từ các đường biểu diễn biến thiên mực nước theo thời gian, có thể thấy rằng mực nước tính toán bởi mô hình hơi lớn hơn mực nước đo trong thí nghiệm khi sóng leo, tuy nhiên khi sóng rút thì mực nước tính toán và mực nước đo rất gần nhau.

5. KẾT LUẬN

Một mô hình sóng vỡ dựa trên hệ phương trình Reynolds được phát triển để bao gồm cả lớp biên đáy và vùng sóng leo trong miền tính toán. Nhằm đạt được độ phân giải cao trong vùng lân cận đáy biển, nơi gradient vận tốc rất lớn do ảnh hưởng của tính nhớt, một kỹ thuật biến đổi điểm được sử dụng để tạo nên một hệ thống lưới sai phân không đều. Các thành phần ứng suất Reynolds trong các phương trình bảo toàn động lượng được xác định bằng cách áp dụng khái niệm hệ số nhớt rối của Boussinesq, trong đó phân bố hệ số nhớt rối trong vùng ngoài lớp biên được xác định bằng mô hình do Duy and Shibayama (1997) đề nghị, còn phương trình k hoặc k-ε được giải để xác định phân bố hệ số nhớt rối trong lớp biên đáy. Lời giải số của mô hình được thực hiện trong một miền biến đổi, sử dụng một quá trình tính toán gồm 5 bước. Các nhận xét kết luận sau đây được rút ra từ lời giải số và kết quả kiểm chứng mô hình:

(1) Đối với sóng vỡ dạng sủi bọt hay dạng bổ nhào yếu, sự truyền rối sinh ra do sóng vỡ từ vùng bên trên xuống lớp biên đáy được giả thiết là có thể bỏ qua. Nếu không có sự trao đổi rối với vùng bên trên, nguồn tạo rối trong lớp biên đáy như vậy chủ yếu xuất xứ từ ứng suất tiếp xúc. Các kiểm chứng đối với lời giải số của vận tốc ngang và động năng rối trong lớp biên đáy đã khẳng định giả thiết nêu trên. Trong trường hợp sóng vỡ dạng bổ nhào, các xoáy cuộn xuất phát từ mặt nước sẽ di chuyển xuống đáy và có thể ảnh hưởng đáng kể đến cấu trúc rối của lớp biên đáy, mô hình này cần được cải tiến để có thể mô phỏng hợp lý các đặc điểm động lực của lớp biên đáy.

(2) Các kiểm chứng mô hình đối với thí nghiệm TH1 cho thấy trong trường hợp sóng vỡ dạng bọt, lời giải số có thể dự báo tốt cao độ mặt nước và vận tốc ngang cho cả lớp biên đáy và miền phía trên của vùng sóng vỡ, đồng thời cũng mô phỏng hợp lý cường độ của động năng rối trong lớp biên đáy. Tuy nhiên, ở sâu trong vùng sóng vỡ, giá trị cực đại của vận tốc ngang tính toán bởi mô hình khá lớn so với giá trị đo đạc.

(3) Từ kết quả kiểm chứng mô hình đối với thí nghiệm TH2, có thể thấy rằng mô hình mô phỏng tốt các quá trình động lực của vùng sóng vỡ hình thành do sóng dạng bổ nhào. Điều này có nghĩa là chuyển động rối do sự vỡ sóng có thể ảnh hưởng hoặc không ảnh hưởng đến cấu trúc rối trong lớp biên đáy, nhưng rối xuất phát từ đáy biển có ảnh hưởng không đáng kể đến chuyển động rối trong miền ngoài lớp biên đáy. Các so sánh trong trường hợp này cho thấy mô hình có khả năng dự báo tốt biến thiên mặt nước, vận tốc ngang và vận tốc đứng cho miền ngoài lớp biên đáy của vùng sóng vỡ.

(4) Chuyển động chất lỏng trong vùng sóng leo được tính toán và kiểm chứng đối với thí nghiệm TH3. Kết quả so sánh cho thấy mô hình có thể mô phỏng sự leo lên và rút xuống của sóng trên bờ biển có mái dốc đều. Trong giai đoạn sóng leo, mực nước tính toán khá lớn so với mực nước đo, nhưng trong giai đoạn sóng rút thì mực nước mô phỏng rất phù hợp với các số liệu đo đạc.

LỜI CẢM TẠ

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Ngân sách dành cho Nghiên cứu Khoa học của Bộ Giáo dục, Khoa học và Văn hóa Nhật Bản [No. B(2)-11450187].

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Asano, T. (1994). Swash motion due to obliquely incident waves, *Proc. 24th Int. Conf. Coastal Eng.*, ASCE, **1:** pp. 27-41.

Christensen, E.D. and R. Deigaard (2001). Large eddy simulation of breaking waves, *Coastal Eng.*, Elsevier, **42:** pp. 53-86.

Cox, D.T., N. Kobayashi, and A. Okayasu (1996). Experimental and numerical modeling of surf zone hydrodynamics, *Res. Report No. CACR-*

95-07, Center for Applied Coastal Res., Univ. of Delaware.

Duy, N.T. and T. Shibayama (1997). A convection-diffusion model for suspended sediment in the surf zone, *J. Geophys. Res*. **102**: pp. 22169-23186.

Duy, N.T., T. Shibayama, and A. Okayasu (1998). A 2-DV numerical solution for the turbulent wave boundary layer under breaking waves, *Proc. 26th Int. Conf. Coastal Eng.*, ASCE, **1:** pp. 448-497.

Duy, N.T., T. Shibayama, and A. Okayasu (2000). A unified numerical model for the bottom boundary layer and the upper layer in the surf zone, *Proc. 27th Int. Conf. Coastal Eng.*, ASCE, **1:** pp. 120-133.

Fletcher, C.A.J. (1991). *Computational Techniques for Fluid Dynamics*, 2nd ed., Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp. 299-328.

Goda, Y. (1975). Deformation of irregular waves due to depth-controlled wave breaking, *Report Port and Harbour Tech. Res. Inst.*, Kurihama, Japan, **14(3)**.

Hibberd, S. and D.H. Peregrine (1979). Surf and run-up on a beach: a uniform bore, *J. Fluid Mech*. **95:** pp. 323-345.

Longuet-Higgins, M.S. (1970). Longshore currents generated by obliquely incident sea waves, *J. Geophys. Res*. **75:** pp. 6790-6801.

Michi, M. (1982). *Laboratory Experiments for Water Motion in the Swash Zone*, Master Thesis, Dept. Civil. Eng., Univ. of Tokyo (in Japanese).

Nishimura, H., M. Isobe, and K. Horikawa (1977). Higher order solutions of the Stokes and the cnoidal waves, *J. Fac. Eng., Univ. of Tokyo*, **B-34: pp.** 267-293.

Okayasu, A., T. Shibayama, and K. Horikawa (1988). Vertical variation of undertow in the surf zone, *Proc. 21st Int. Conf. Coastal Eng.*, ASCE, **1:** pp. 478-491.

Rodi, W. (1980). *Turbulence Models and their Application in Hydraulics – A State of the Art Review*, Univ. of Karlsruhe, Karlsruhe, Germany.

Shibayama, T. and N.T. Duy (1994). A 2-D vertical model for wave and current in the surf zone based on the turbulent flow equations, *Coastal Eng. in Japan*, JSCE, **37:** pp. 41-65.

Svensen, I.A. and J.B. Hansen (1988). Cross-shore currents in surf zone modeling, *Coastal Eng*., Elsevier, **12:** pp. 23-42.

Tao, J. (1984). Numerical modeling of wave runup and breaking on the beach, *Acta Oceanologica Sinica* **6:** pp. 692-700.

Watanabe, Y. and H. Saeki (1999). Three dimensional large eddy simulation of breaking waves, *Coastal Eng. J*., JSCE, **41:** pp. 281-301.

Yamada, F. and K. Takikawa (1999). Numerical models with Reynolds equation based energy dissipation for plunging breakers on a uniform slope, *Coastal Eng. J*., JSCE, **41:** pp. 247-267.