

MÔ HÌNH SỐ TÍNH TOÁN LAN TRUYỀN SÓNG

BÙI THỊ THÙY DUYÊN^{1,2}, DR. XUFUMIN¹

^[1] Khoa Kỹ thuật bờ biển, Đại học Hồ Hải, Nam Kinh, Trung Quốc.

^[2] Khoa Công trình, Đại học Giao thông vận tải Tp.HCM, Việt Nam.

Tóm tắt: Bài báo này giới thiệu một số phương pháp số để tính toán lan truyền sóng từ vùng nước sâu đến vùng ven bờ và phân tích hạn chế của từng mô hình. Trọng tâm bài báo tập trung vào mô hình tích phân theo độ sâu (depth integrated models) và mô hình phương trình RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes equations).

I. Giới thiệu

Sóng ngoài khơi thường là tổng hợp của rất nhiều tần số sóng. Các sóng thành phần có tần số sóng cao hơn thì lan truyền với tốc độ bé hơn so với sóng có tần số sóng thấp hơn. Ở vùng nước sâu, sóng không bị ảnh hưởng bởi hình thái đáy biển. Tuy nhiên, khi tiến vào vùng thềm lục địa, sóng hoặc bị khúc xạ do tác động của đáy của dòng chảy hoặc bị nhiễu xạ quanh khu vực đáy biển có sự thay đổi đột ngột chẳng hạn như vùng biển có đụn cát đáy, đê chắn sóng... Một phần năng lượng sóng phản xạ ngược trở lại vùng biển sâu. Tiếp tục tiến vào vùng nước gần bờ, sóng mất đi phần lớn năng lượng do ma sát đáy, profile sóng có sự thay đổi: dốc hơn, biên độ sóng tăng lên, chiều dài sóng giảm đi. Điều này là lí do của hiện tượng

sóng vỡ. Ứng xử của sóng biển từ ngoài khơi vào vùng gần bờ là vô cùng phức tạp; Thông thường các đặc trưng của sóng được tổng hợp từ ngoài khơi; và các đặc trưng sóng nước sâu này nhất thiết phải được tính đổi thành các đặc trưng của sóng tại vùng dự án được nghiên cứu. Công tác nghiên cứu, quy hoạch và thiết kế các công trình để chế ngự thiên nhiên cụ thể ở đây là sóng biển đòi hỏi cần có các thông số sóng thật chính xác. Yêu cầu về độ chính xác của các tham số sóng dùng cho tính toán thiết kế ngày càng cao; do đó rất nhiều các nghiên cứu về mô hình biến dạng của sóng biển đã được thực hiện. Bên cạnh việc nghiên cứu qua các mô hình thí nghiệm, các mô hình số cũng đã được sử dụng. Đặc biệt là hiện nay thì sự phát triển của khoa học máy tính, phương pháp số đã trở nên phổ biến.

Bảng 1. Tổng hợp một số phương pháp số miêu tả sự lan truyền sóng

Mô hình số	Giới hạn về phi tuyến	Giới hạn về khuếch tán tần số
Tuyến tính /Giải tích	$a/h \sim 0$	kh không giới hạn – khuếch tán hoàn toàn
Tích phân độ sâu /Phương pháp số	$a/h \sim O(1)$ – hoàn toàn phi tuyến	$kh \sim 0$ Sóng nước nông phi tuyến $kh < \sim 3$ ($l/h > 2$) Boussinesq $kh < \sim 5$ ($l/h > 1.2$) Boussinesq bậc cao.
Mô hình đa lớp	$a/h \sim O(1)$ – phi tuyến hoàn toàn	$kh < \sim 8$ ($l/h > 0.8$) 2-lớp $kh < \sim 15$ ($l/h > 0.4$) 3-lớp $kh < \sim 30$ ($l/h > 0.2$) 4-lớp
Navier Stokes	Phi tuyến hoàn toàn	Khuếch tán hoàn toàn

Các nghiên cứu gần đây thường tập trung vào mô hình số tích phân theo độ sâu (depth-integrated models), mô hình này có thể miêu tả đầy đủ quá trình lan truyền sóng phi tuyến từ vùng nước sâu vào vùng nước nông. Đối với hiện tượng sóng vỡ, để miêu tả quá trình sóng vỡ thì sử dụng mô hình phương trình RANS (Reynolds Averaged Navier Stocks) có xét đến tính rối. RANS cũng được dùng để nghiên cứu tương tác sóng và công trình. Mục đích của bài báo là tìm hiểu sự phát triển của mô hình tích phân độ sâu và sự mô phỏng quá trình sóng vỡ của mô hình.

II. Mô hình tích phân theo độ sâu (Depth Integrated Models)

2.1 Phương trình tích phân theo độ sâu

Điều kiện dòng không xoáy trong vùng nước nông ta có $u(x,z,t) \sim u(x,t)$ và $\frac{w}{u} \sim 0$

Các phương trình cơ bản mô tả sóng:

Phương trình liên tục:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Phương trình động lượng theo phương ngang và phương đứng:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + g \quad (3)$$

Phương trình điều kiện biên bề mặt tự do và biên đáy:

$$w(x, \eta, t) = \frac{\partial \eta}{\partial t} + u(x, t) \frac{\partial \eta}{\partial x}$$

$$w(x, -h, t) = -u(x, t) \frac{\partial h}{\partial x} \quad (4) \text{ và } (5)$$

Lấy tích phân phương trình liên tục theo độ sâu:

$$\int_{-h}^{\eta} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) dz = 0 \quad (6)$$

Dựa vào các điều kiện biên và một vài bước tính toán, ta được:

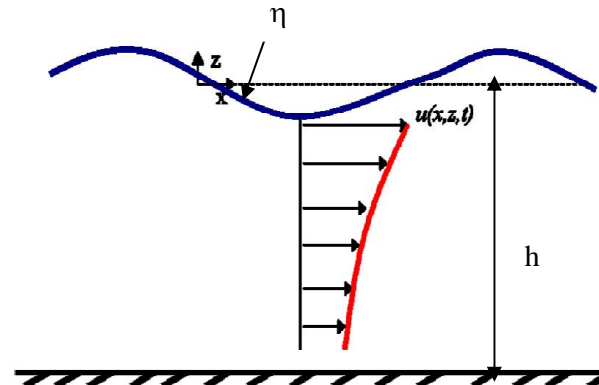
$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial [(h + \eta)u]}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

Tích phân phương trình động lượng theo phương z từ đáy $-h$ đến mặt thoáng η để xác định áp suất p, sau đó thay p vào phương trình

động lượng theo phương ngang:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g\eta = 0 \quad (8)$$

Hình 1 thể hiện các thông số sóng được dùng trong các công thức



u, w vận tốc theo phương x và z; h - độ sâu khu nước;
 η - đường mặt sóng

Hình 1. Các thông số sóng cơ bản

2.2 Phương trình mild-slope

Phương trình mild-slope để mô tả lan truyền sóng dựa trên lý thuyết sóng tuyến tính. Với dao động sóng có tần số dao động ω , dịch chuyển bề mặt η ta có thể biểu diễn hàm thế vận tốc như sau:

$$\varphi = \frac{-ig\eta}{\omega} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} e^{-i\omega t} \quad (9)$$

k - số sóng và h - độ sâu thay đổi rất chậm theo phương x,y.

Phương trình thể hiện quan hệ khuếch tán với tần số: $\omega^2 = gk \cdot \tanh kh$ (10)

Theo Smith và Sprinks (1975), dịch chuyển bề mặt η phải thỏa mãn phương trình sau:

$$\nabla \cdot (C C_g \nabla \eta) + \frac{\omega^2}{g} \eta = 0 \quad (11)$$

với $C = \frac{\omega}{k}$; $C_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{C}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right)$ là vận tốc truyền sóng đơn và vận tốc truyền sóng của nhóm sóng.

Phương trình vi phân (11) được gọi là phương trình mild-slope. Có thể thấy được hai hạn chế của phương trình này, đó là: - Đối với sóng dài trong vùng nước nông $kh \ll 1$, phương trình (11) trở thành phương trình sóng nước nông tuyến tính đúng ngay cả khi $\delta = O(1)$

($\delta = \frac{|\nabla h|}{kh}$). Còn nếu độ sâu khu nước là hằng số hoặc sóng ngắn trong vùng nước sâu ($kh \gg 1$), phương trình (11) thành phương trình Helmholtz có số sóng k thỏa mãn phương trình khuếch tán (10).

Do đó, phương trình mild-slope nên được điều chỉnh cho tất cả các giá trị của kh . Phương trình mild-slope chỉ thích hợp tính toán lan truyền sóng từ vùng nước sâu vào vùng nước nông với giả thuyết sóng tuyến tính. Một vấn đề khó khăn khi áp dụng mild-slope cho vùng biển rộng đó là xác định các điều kiện biên dọc bờ. Giải pháp cho vấn đề này là áp dụng “gần đúng

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} + \left(2ik_0 + \frac{1}{CC_g} \frac{\partial CC_g}{\partial x} \right) \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{1}{CC_g} \frac{\partial CC_g}{\partial y} \frac{\partial \xi}{\partial y} + \left(\frac{\omega^2}{g} - k_0^2 + \frac{ik_0}{CC_g} \frac{\partial CC_g}{\partial x} \right) \xi = 0 \quad (13)$$

Phương trình (13) là phương trình mild-slope mở rộng.

2.3 Phương trình Boussinesq

Peregrine đã phát triển phương trình Boussinesq chuẩn (standard Boussinesq) với độ sâu thay đổi.

$$\eta_t + \nabla[(\eta + h)\bar{u}] = 0 \quad (14)$$

$$\bar{u}_t + \frac{1}{2} \nabla |\bar{u}|^2 + g \nabla \eta + \left\{ \frac{h^2}{6} \nabla(\nabla \bar{u}_t) - \frac{h}{2} \nabla(\nabla(h\bar{u}_t)) \right\} = 0 \quad (15)$$

Trong đó: \bar{u} vận tốc trung bình độ theo độ sâu, gradient $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right)$, g – gia tốc trọng trường. $\bar{\eta}_t, \bar{u}_t$ đạo hàm từng phần của dịch chuyển bề mặt sóng và vận tốc trung bình độ

$$\eta_t + \nabla[(\eta + h)u_\alpha] + \nabla \cdot \left\{ \left(\frac{z_\alpha^2}{2} - \frac{h^2}{6} \right) h \nabla(\nabla u_\alpha) + \left(z_\alpha + \frac{h}{2} \right) h \nabla(\nabla u_\alpha) \right\} = 0 \quad (16)$$

$$u_\alpha + \frac{1}{2} \nabla |u_\alpha|^2 + g \nabla \eta + z_\alpha \left\{ \frac{1}{2} z_\alpha \nabla(\nabla u_\alpha) + \nabla(\nabla(h u_\alpha)) \right\} = 0 \quad (17)$$

Công thức (16) và (17) là phương trình bảo toàn khối lượng và động lượng, là một trong các phương trình ‘Boussinesq hiệu chỉnh’ được sử dụng nhiều trong tính toán truyền sóng. Theo Chen (1998), nếu $z_\alpha = -0.531.h$ thì các phương trình ‘Boussinesq hiệu chỉnh’ có thể mô phỏng sóng lan truyền từ vùng có độ sâu nước tương đối ($h/L \sim 0.5$,

parabolic” (parabolic approximation) cho phương trình mild-slope (Kirby và Dalrymple 1983). Có nghĩa là: trong phương trình mild-slope (11), dịch chuyển bề mặt η có thể xem gần đúng khi sóng lan truyền theo phương x với biên độ sóng thay đổi theo hai phương mặt phẳng ngang x, y . Do đó:

$$\eta = \xi(x, y) e^{ik_0 x} \quad (12)$$

Với k_0 - số sóng là hằng số

Phương pháp ‘gần đúng parabolic’ giả thiết rằng: Hàm biên độ A thay đổi nhanh đáng kể theo phương y hơn phương x , $\partial^2 \xi / \partial y^2 \gg \partial^2 \xi / \partial x^2$.

Thay (12) vào (11) ta được:

sâu theo thời gian t .

Phương trình ‘Boussinesq chuẩn’ không thích hợp để tính toán sóng ở vùng nước nông. Để áp dụng cho các sóng ngắn hơn, rất nhiều nhà nghiên cứu đã hiệu chỉnh phương trình ‘Boussinesq chuẩn’ (ví dụ như Madsen 1991, Nwogu 1993, Chen và Liu 1995). Mặc dù sự hiệu chỉnh các phương trình có khác nhau nhưng kết quả thì tương tự nhau.

Theo Nwogu, các phương trình tích phân theo độ sâu của phương trình liên tục và phương trình động lượng có thể được viết theo các đại lượng η - độ dâng bề mặt sóng và u_α - vận tốc chuyển động theo phương x tại độ sâu $z = z_\alpha$

L – chiều dài sóng) đến vùng nước nông và có thể mô phỏng sự tương tác giữa sóng và dòng chảy. Phương trình ‘Boussinesq hiệu chỉnh’ có thể miêu tả sóng ở vùng nước có độ sâu tương đối song vẫn còn nhiều hạn chế. Khi sóng tiến đến gần bờ, chiều cao sóng tăng do hiện tượng sóng vỡ; tỉ số chiều cao sóng và độ sâu nước tăng cao điều này thì

phương trình ‘Boussinesq hiệu chỉnh’ cần phải hiệu chỉnh thành phương trình sóng

$$\eta_t + \nabla \cdot \left\{ (h + \eta) \left[u_\alpha + \left(z_\alpha + \frac{1}{2}(h - \eta) \right) \nabla (\nabla (h u_\alpha)) + \left(\frac{1}{2} z_\alpha^2 - \frac{1}{6}(h^2 - h\eta + \eta^2) \right) \nabla (\nabla u_\alpha) \right] \right\} = 0 \quad (18)$$

$$u_{\alpha t} + \frac{1}{2} \nabla \cdot |u_\alpha|^2 + g \cdot \nabla \eta + z_\alpha \left\{ \frac{1}{2} z_\alpha \nabla (\nabla u_\alpha) + \nabla (\nabla (h u_\alpha)) \right\} + \nabla \cdot \left\{ \frac{1}{2} (z_\alpha^2 - \eta^2) (u_\alpha \cdot \nabla) (\nabla u_\alpha) + \frac{1}{2} [\nabla (h u_\alpha) + \eta \cdot \nabla u_\alpha]^2 \right\} + \nabla \cdot \left\{ (z_\alpha - \eta) (u_\alpha \cdot \nabla) (\nabla (h u_\alpha)) - \eta \left[\frac{1}{2} \eta \cdot \nabla u_{\alpha t} + \nabla (h u_\alpha) \right] \right\} = 0 \quad (19)$$

Năm 2000, Hsiao đã sử dụng công thức trên để nghiên cứu ảnh hưởng của đê chắn sóng ngầm. Lynett và Liu đã phát triển công thức (18) và (19) bằng cách thêm đại lượng tích phân độ sâu theo thời gian để tính toán lan truyền sóng khi có sự dịch chuyển đường bờ.

Các lý thuyết trình bày trên đây đều dựa trên giả thuyết không có sự tiêu tán năng lượng trong quá trình truyền sóng. Tuy nhiên, trong hầu hết các vấn đề liên quan đến sóng biển, ảnh hưởng do tiêu tán năng lượng sóng là rất quan trọng. Do đó phương trình Mild-slope có thể hiệu chỉnh bằng cách thêm hàm phân tán năng lượng. Hàm phân tán năng lượng thường xác định theo các quá trình tiêu tán khác nhau (Dalrymple 1984). Để mô phỏng sóng vỡ, đại lượng đặc trưng sóng vỡ ($\alpha A_{j,l}$) với $A_{j,l}$ thể hiện biên độ sóng phức của sóng thành phần tần số sóng thứ j và l . α là hệ số tiêu tán năng lượng phụ thuộc vào mô hình sử dụng miêu tả sóng vỡ.

Tương tự, mô hình số dựa theo phương trình Boussinesq ta thêm một đại lượng mới vào phương trình tích phân động lượng theo độ sâu để tham số hóa quá trình sóng vỡ. Karambas và Kuotias (1992), Kennedy (2000) đã thêm vào phương trình thành phần độ nhớt xoáy (eddy viscosity). Schaffer (1993) thì đã sử dụng mô hình ‘sóng cuộn’ phức tạp hơn dựa theo khái niệm ‘sóng cuộn bề mặt’ cho sóng vỡ tràn. Hai mô hình này đã cho kết quả phù hợp với kết quả thí nghiệm về profile bề mặt sóng, nhưng cả hai mô hình hiệu chỉnh này đều cho lời giải có sai số khá lớn so với

nước nông phi tuyến. Liu (1994), đã đưa ra dạng phương trình Boussinesq mới:

thí nghiệm về trường vận tốc và sự phân bố năng lượng. Do đó cần phải tìm được một mô hình thích hợp để mô phỏng quá trình sóng vỡ.

III. Mô hình các phương trình RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) cho sóng vỡ.

Một số mô hình số 2-D mô phỏng sóng vỡ hiệu quả như: mô hình MAC (the Marker and Cell model) của Johnson (1994) và mô hình VOF (the Volume of fluid method) của Lin và Liu (1998). Các phương trình RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) kết hợp với mô hình rối k- ϵ bậc hai cũng đã được Liu (1998) dùng để miêu tả sóng vỡ tràn và sóng vỡ đổ. Bài báo này chủ yếu giới thiệu về mô hình RANS.

Đối với dòng chảy rối, trường vận tốc và trường áp suất được chia thành 2 phần: một là vận tốc và áp suất trung bình (u_{tb} và p_{tb}), hai là vận tốc và áp suất rối (u' và p'). Nghĩa là: $u_i = u_{tbi} + u'_i$ và $p = p_{tb} + p'$ (20). Với $i = 1, 2, 3$ cho dòng 3-D. Nếu chất lỏng được giả thiết là không nén được thì phương trình RANS được viết như sau:

$$\frac{\partial u_{tbi}}{\partial x_i} = 0 \quad (21)$$

Và

$$\frac{\partial u_{tbi}}{\partial t} + u_{tbj} \frac{\partial u_{tbi}}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p_{tb}}{\partial x_i} + g_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{tbij}}{\partial x_j} - \frac{\partial u'_j u'_i}{\partial x_j} \quad (22)$$

Trong đó: ρ - trọng lượng riêng, $\tau_{tbi,j}$ là tensor ứng suất phân tử trung bình $\tau_{tbi,j} = 2\mu \sigma_{tbi,j}$ với μ độ nhớt và $\sigma_{tbi,j} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u_{tbi}}{\partial x_j} + \frac{\partial u_{tbj}}{\partial x_i} \right]$ là tensor ứng suất cắt của dòng trung bình.

Ở phương trình động lượng (21), sự ảnh

hường của dao động rối lên dòng trung bình được thể hiện qua tensor ứng suất Reynolds $[u'_{ij}, u'_{ij}]$.

Phương trình vi phân k-ε chủ đạo (Liu và Lin 1998):

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_{bj} \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - u'_i u'_j \frac{\partial u_{bi}}{\partial x_j} - \varepsilon \quad (23)$$

Với $\nu = \mu / \rho$: độ nhớt động học phân tử, ν_t là độ nhớt rối và $\varepsilon = \nu \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \right)^2$ đại lượng đặc

trung mức độ tiêu tán năng lượng động học rối.

Trong phương trình chuyển động (23), về trái thể hiện sự đối lưu còn về phải thể hiện sự khuếch tán. Đại lượng thứ hai và thứ ba của về phải phương trình (23) đặc trưng cho tính vận chuyển và tiêu tán năng lượng do tính rối.

Để giải được phương trình chủ đạo các phương trình điều kiện biên cần phải được thiết lập. Đối với dòng trung bình, điều kiện không trượt đối với biên cứng và điều kiện ứng suất bằng không cho mặt tự do chất lỏng (bỏ qua ảnh hưởng lớp không khí. Với dòng rối, gần biên cứng, thì yêu cầu là vận tốc tiếp tuyến trung bình trong lớp biên rối phân bố theo quy luật Logarit nhằm mục đích biểu diễn k và ε như là hàm của tọa độ và vận tốc tiếp tuyến trung bình nằm ngoài lớp nhớt bên dưới. Điều kiện biên tại mặt thoáng có gradient

$$\frac{\partial k}{\partial n} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial n} = 0 \quad (24)$$

Các phương trình RANS được giải bằng phương pháp sai phân hữu hạn. Phương trình đối lưu (về trái của phương trình (23)) được xác định bằng phương pháp sai phân trung tâm và sai phân tiến. Gradient ứng suất và áp suất thì

xác định bằng phương pháp sai phân trung tâm. Phương pháp VOF được dùng để xác định mặt tự do. Phương trình chuyển động k-ε (23) được giải tương tự như với phương trình động lượng. Nhiều nhà nghiên cứu đã sử dụng phương pháp RANS để mô tả sóng vỡ và so sánh thí nghiệm, kết quả rất tốt. Mô hình này gần đây còn được áp dụng để mô phỏng tương tác giữa sóng và công trình bờ biển.

IV. Kết luận:

Với sự phát triển nhanh chóng của ngành khoa học máy tính, chúng ta đã có thể giải các phương trình Navier-Stokes trong miền tính toán tương đối lớn. Các mô hình lan truyền sóng vẫn phải phụ thuộc vào một số các công cụ toán học để có thể mô phỏng các điều kiện sóng phức tạp hơn. Như đã trình bày, các mô hình 2-D tích phân theo độ sâu ngày nay được sử dụng rộng rãi. Xu thế hiện nay, nếu các mô hình số có sai số bậc hai $O(\mu^2)$, thì mô hình có thể phù hợp với $k.h \approx 3$. Với sự xuất hiện của mô hình số dựa theo RANS, mà các nghiên cứu về sóng vỡ, về tương tác giữa sóng và công trình đạt được những kết quả quan trọng, tuy nhiên sự phát triển mô hình vẫn ở trong giai đoạn tìm hiểu ban đầu. Cần tìm ra các mô hình thích hợp, phát triển các mô hình 3-D, tối ưu hóa các thuật giải để giảm khối lượng tính toán, giảm chi phí... Một trong các nghiên cứu cần đặt ra là tích hợp mô hình tích phân độ sâu 2-D với mô hình 3-D RANS. Mô hình 3-D RANS không chỉ dùng để tính sóng vỡ mà còn xác định tương tác giữa sóng và công trình. Kết quả từ mô hình 3-D RANS có thể lấy tích phân và tham số hóa để sử dụng cho mô hình 2-D tích phân theo độ sâu.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Chen, Q., Madsen, P.A., Schaffer (1998): Wave-current interaction based on an enhanced Boussinesq approach, Coastal Engineering, Volume 33, pp.11-39.
- [2] Chen, Y. và Liu, P.L-F (1995): Modified Boussinesq equations and associated parabolic models for water wave propagation, Journal of Fluid Mech., Volume 288, pp. 351-381.
- [3] Dalrymple, Kirby, Hwang (1984): Wave diffraction due to area of energy dissipation, J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng, ASCE Volume 110(1), pp.67-79.

- [4] Hirt, C.W. and Nichols, B.D. (1981): Volume of fluid (VOF) method for dynamics of free boundaries. J.Comput.Phys.39, pp. 201-225.
- [5] Hsiao, S.-C., Liu, P.L.-F. and Chen, Y. (2000): Nonlinear Water Waves propagating Over a Permeable Bed. Proc. R. Soc. Lond. A 2002 458, 1291-1322.
- [6] Johnson, D.B., Raad, P.E. and Chen, S. (1994): Simulation of impacts of fluid free surface with solid boundary, Int. Journal Numer, Meth, Fluids, Volume 19, 153-174.
- [7] Karambas, Th. V. and Koutitas, C. (1992): A breaking wave propagation model based on the Boussinesq equations, Coastal Eng., Volume 18, pp. 1-19.
- [8] Kennedy, A.B., Chen, Q., Kirby, J.T. and Dalrymple, R.A. (2000): Boussinesq modeling of wave transformation, breaking and runup, I: 1D. J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, 126 (1), 39-48.
- [9] Lin, P. and Liu, P.L.-F. (1998): A Numerical Study of Breaking Waves in the Surf Zone, J. Fluid Mech., 359, 239-264.
- [10] Nwogu, O. (1993): An alternative form of the Boussinesq equations for nearshore wave propagation, J. Waterway. Port, Coastal and Ocean Engering, ASCE, 119, 618-638.

Abstract:

NUMERICAL MODEL TO SIMULATE WAVE TRANSFORMATION

This paper reviews various numerical models for calculating wave propagations from deep water to surf zone, including wave breaking. The limitations for each model are briefly discussed. The main focus of the discussions is on the depth-integrated models for describing fully nonlinear and weakly dispersive waves, and the Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) equations model to calculate breaking waves and associated turbulence.

Key-words: wave propagation, depth-integrated models, RANS.