

船舶航路の V 字型掘削による波浪制御の適用性 に関する実験および数値解析

Feasibility Study on the Wave-Control Method using Navigation Channel with V-Shaped Cross Section

國田 治¹・由比政年²・山崎純一³・小瀧伸也⁴・石田 啓⁵

Osamu KUNITA, Masatoshi YUHI, Junichi YAMAZAKI, Shinya KOTAKI and Hajime ISHIDA

A novel method is proposed to control the wave direction incoming to harbors. In this method, navigation channel to the port entrance is deeply dredged in V-shaped cross-section in order to disperse the wave directions. The channel alignment is parallel to the direction of incoming waves so that it has an effect to refract the waves like a concave lens. The typical length, width, and depth of the channel examined in this study are 1,000 m, 200 m, and 10 m, respectively. The applicability of the method is examined by means of laboratory experiments and numerical simulations. Both the experimental and numerical results have shown the remarkable effect of the proposed method in attenuating the incident waves to the port entrance.

1. はじめに

船舶航路・泊地の静穏度を確保するための技術開発を進めることは、海岸・港湾工学の重要課題の一つである。港内静穏度を確保するために、港湾設計に際して、防波堤の最適配置が検討される。しかしながら、港口部のみは船舶の通行のため締め切ることができない。このため侵入波による擾乱が問題となる場合も少なくない。船舶の通行を阻害せずに、波の進入を防ぐ方法として、空気防波堤、エアバルーン連結防波堤、液状化地盤防波堤、海底フラップなどが考案されてきた。しかしながら、その効果、耐久性、コスト、施工性などの面で何らかの解決すべき課題があり、実用化には至っていない。

これに対し、海底地盤を局部的に掘削し、周囲より水深が深くなるように海底地形を改変すれば、凹レンズ型の屈折効果により波向きが発散され、背後域の波高を低減することが原理的に可能となる。この種の掘削型地形改変による波浪制御は、船舶の航行性を損なうことがないため、港湾開口部からの入射波を低減し、港湾設計の自由度を拡張するための新しい手法として期待できる。

こうした観点から、本研究では、船舶航路を V 字型に深く掘削することで波向きを制御し、航路・泊地での波高を低減させて静穏化を図る工法（図-1 参照。以下、V 字チャンネル工法と表示）を提示し、その適用性に関して、実験的・数値的な基礎検討を実施する。

2. 海底地形改変による波浪制御に関する既往の研究

海底地形を改変することで、波の進行方向を制御しようとする試みは、従来から進められてきた。その代表的なものは、海底地形に浅瀬部分を設け、凸レンズ型の屈折効果で波浪を集中させることで海浜の安定化を図る波向き制御法である（例えば、後野ら、1990；武若ら、1994；鈴木ら、1995）。このような浅瀬部分の形成による地形改変を港湾域へ適用する際には、船舶航行の障害となることが懸念される。一方、掘削型地形改変による波浪制御に関する研究は、局所的なトレンチ溝の設置効果、および、航路の影響に着目したものに大別される。

海底地盤上にトレンチを掘削した場合の波浪変形については、Lee・Ayer(1981)、Williams(1990)等により基礎検討が実施されてきた。航路・泊地での静穏化効果については、McDougalら(1996)、中村・竹本(2001)に報告されている。また、関連した事例として、建設用骨材や養浜材を確保するために沖合を掘削することで、副作用的に波向きの変化が生じ、汀線形状に大きな影響を与え得ることが報告されている（Horikawaら、1977；宇

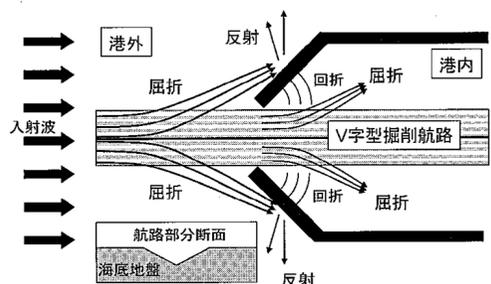


図-1 V 字型航路掘削による波浪制御の概念図

1 正会員 (財)国際臨海開発研究センター
2 正会員 博(工) 金沢大学准教授自然科学研究科
3 修(工) 北陸電力(株)
4 金沢大学自然科学研究科博士前期課程
5 フェロー 工博 金沢大学教授自然科学研究科

多ら, 1985 ; Combe・Soileau, 1987 ; Demir ら, 2004).

航路掘削による波向きの変化に着目した研究は比較的少ない。Zwamborn・Grieve (1974) は, 南アフリカ共和国リチャーズベイ港の港湾計画策定にあたり, 現地を模擬した水理模型実験および波向線法による解析に基づいて, 台形状に掘削された航路と港内静穏度との関係について事例検討を行った。その結果, 航路に対して平行に近い角度で入射する波は, 屈折効果により側方へと発散され, 顕著な静穏化効果が確認された。一方, 屈折変形の臨界角付近で入射する波に対しては, 台形航路の側方斜面付近で波がトラップされ, 波高が増幅される場合があることも指摘された (Zwamborn・Grieve, 1974)。この点については, 他の研究にも同様の報告がある (Li ら, 2000 ; Beltrami ら, 2003)。リチャーズベイ港における, この問題の対処法を探るために, Zwamborn・Grieve (1974) は, 航路形状や防波堤配置に関する検討を行った。その一つとして, 彼らは, 港口近傍の一部区間で航路を V 字状に掘削する案に言及している。水理実験結果から, V 字型断面は有効と推定されたが, その検討は, 体系的な解析に基づいたものではなく, 特定港湾に対する一事例検討の域に留まっている。これに対し, 本研究は, 航路の持つ屈折効果を最大限に活用できるように, V 字型航路と防波堤の最適配置を目指した体系的な解析を実施し, 港内静穏化手法として, 掘削型地形改変を能動的に活用することを志向するものである。

3. V 字断面型航路掘削の代表諸元に関する検討

船舶航路を深く掘削することでもたらされる波浪制御効果を把握するために, 放物型近似された線形緩勾配方程式 (Berkoff, 1972 ; Radder, 1979) に対する数値モデル (土木学会, 1999) を用いて, 必要な航路幅, 長さ, 掘削深について検討した。ここでは, 一様水深 (10 m) の地形上に, V 字状および台形状断面 (図-2) を持つ航路を配置し, 航路に平行に規則波を入射させて, 屈折特性や波高減衰効果を検討した。ここで, V 字型掘削の全幅を 200 m, 最大深さを 20 m (周辺水深 +10 m の掘削) と設定した。台形型航路は, V 字型航路の横断面を鉛直位置 $Z = -15$ m でカットして台形にしたものである。V 字型断面の最大掘削深は, 台形断面の 2 倍であるが, 必要な掘削量は, 台形断面の 4/3 倍となる。

計算結果の一例として, 波高増幅率の空間分布を図-3 (a) に示す。図の上側が V 字型航路, 下側が台形航路に対応する。破線内部が掘削部分である。また, 図中の濃淡の濃い部分が減衰の顕著な領域を表している。この図より, 航路部分に入射した波は, 水深の変化により屈折し, すみやかに側方へと波向きを変化させることがわかる。その結果, 航路部分では波高が急激に減衰していく。

一方, 航路の側方部, すなわち, 中央部から屈折してきた波と沖から直進してきた波とが重ね合わされる領域では, 波高が増幅される。こうした定性的な傾向は V 字・台形両断面形状に共通であるが, 定量的な減衰効果は V 字断面の方が顕著である。入射波周期を 10 ~ 14 秒の範囲で変化させた場合にも, 同様の結果が得られた。なお, 定量的には, 周期 (波長) の長い波ほど, 屈折効果がより顕著に発揮される傾向となる。

図-3 (b) は, 航路中央部における波高減衰の様子を示している。航路を V 字状に掘削した場合, 所定の減衰効果を得るために必要な距離として, この条件下では, 入射波高を 50 %, 20 % まで低減するために, それぞれ,

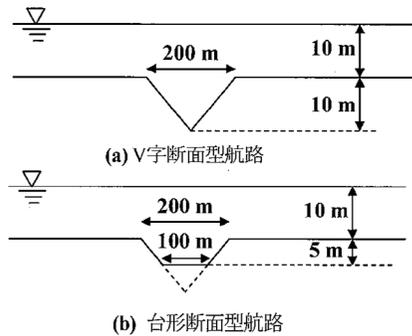
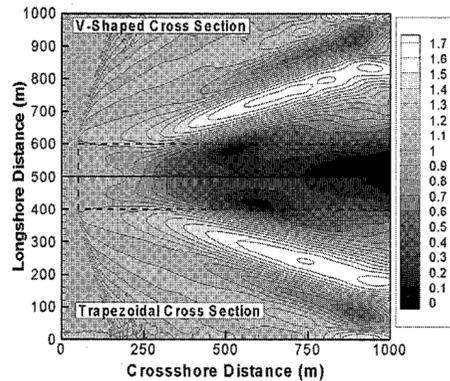
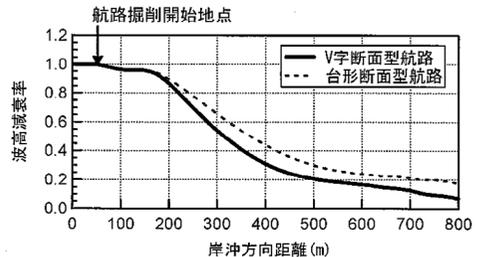


図-2 航路断面 (沿岸方向) の設定



(a) 波高増幅率の平面分布



(b) 航路中央部における波高の岸沖方向変化

図-3 緩勾配方程式に基づく解析結果 (規則波, 周期 12s, 構造物なし)

300 m (深海波長の約 1.4 倍) および 500 m (同約 2.2 倍) 程度の航路長確保が必要という結果となった。

一般に、港の進入航路の長さは、船舶のストップングディスタンスを確保できるよう計画される。ストップングディスタンスは、通常、船長の 5 倍程度とされ、重量トン数 6 万 dwt、船長 250 m 級の船舶であれば 1250 m 程度の航路長が確保される。したがって、航路沖合部から V 字型掘削を開始することにより、標準的な航路設定長の範囲内で、十分な波高低減効果を期待できる。

4. 規則波に対する水理実験

前節の結果を踏まえて、V 字型航路を有する港湾模型を作成し、規則波に対する平面 2 次元水理実験を実施して、V 字型掘削による波向き制御の有効性や港内波高の低減効果について検討した。

実験にあたっては、現地スケールを 1/196 に縮小して港湾模型を作成し (図-4)、北陸電力(株)技術開発・環境保全センターの平面 2 次元水槽 (全長 24.2 m, 全幅 17 m) に設置して計測を行った。容量式波高計による計測点位置 (計 171 点) を図-5 に示す。模型水平部のレベル誤差は ±1 mm 以下となるよう調整した。防波堤にはコンクリートブロックを使用し、越波しない高さに設定した。V 字型航路は港湾模型の中央に配置され、V 字部分の全幅、全長、最大水深は、現地換算値で、それぞれ、180 m, 1250 m, 23 m (周辺部から 9 m 掘削) に相当する。なお、模型前面部には約 1/6 勾配の斜面が存在し、その途中から V 字型溝が設置されている。斜面沖側の水深は、46 m 相当である。入射波として、荒天時の周期の長い波を想定し、現地換算周期 14 s、波向きを航路部と平行とした。入射波は、模型前面の斜面で浅水変形し、法肩部で碎波した後に港湾部 (水深 14 m 相当) へ入射する。また、比較のため、中央部に航路を設置せず、水平床とした場合の計測を合わせて行った。

図-6 は、港内波高分布に着目し、航路部分に平行に取った断面上での波高分布を比較したものである。中心軸上 (Ch5) では、航路部分を波が進行するにつれて屈折効果が発揮され、波高が低減される効果が確認できる。また、屈折効果により、中央部で最も波高が小さく、側方で大きくなる。これは、航路を設置せず水平床とした場合に、中央部で波高が大きくなることと対照的である。

V 字チャンネルの有無による、波高分布の変化を比較した例を図-7(a) に示す。中心軸に関して対称位置にある波高計の値を平均し、上側に V 字チャンネルを設置した場合、下側に設置しない場合の結果を対比して示した。中心軸上を取り上げて比較したものが図-7(b) である。これらの図から、V 字チャンネルの有無による波高分布の違いや、中心軸上での静穏化効果などが確認できる。

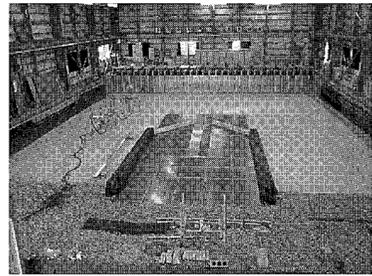


図-4 実験装置および港湾模型の概要

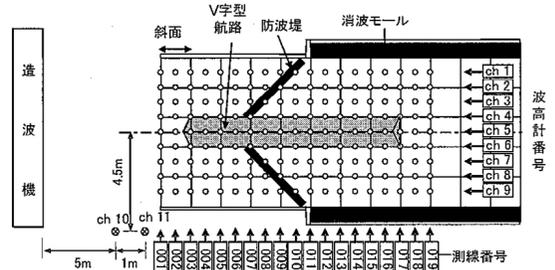


図-5 港内波高分布の計測位置

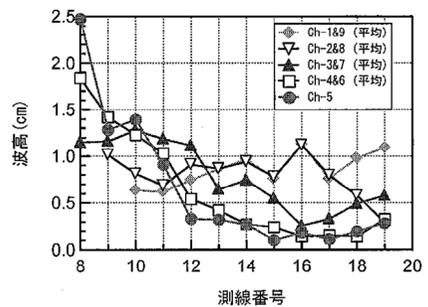
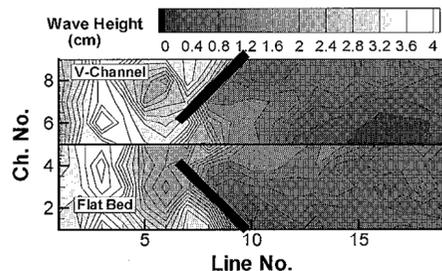
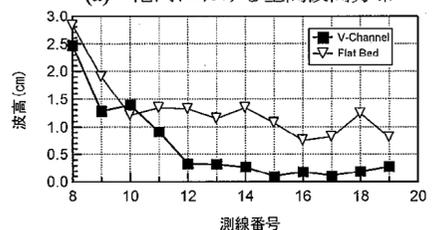


図-6 港内波高分布の計測値



(a) 港内における空間波高分布



(b) 港内中央部における波高分布

図-7 V 字チャンネルの有無による波高分布の比較

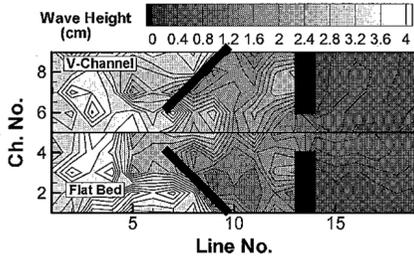


図-8 二重防波堤配置の場合の波高分布

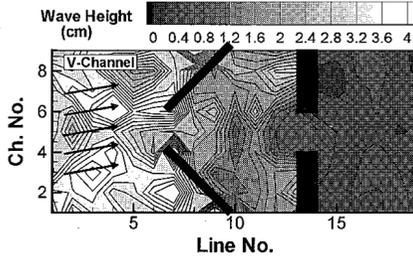


図-9 斜め入射の場合の波高分布 (入射角 10 度)

さらに、防波堤を二重配置した場合や、規則波を斜め入射させた場合について実験を行った。その結果の一部を図-8, 9 に示す。予想される通り、防波堤を二重にした場合、岸側防波堤背後での静穏化効果はより顕著となる。ただし、岸側防波堤前面では、重複波が形成され、沖側防波堤のみの場合と比べて波高が増大する。このため、岸側の防波堤で反射する屈折波を適切に処置できるような配置・方策を考案する必要がある。図-9 に示す斜め入射の場合においても、航路内で波高が大きく増加することはなかった。この点は、Zwamborn・Grieve(1974)の結果と整合する。今後、港口部までの航路長や入射角を変化させてより詳細な確認を実施する予定である。

5. 規則波・孤立波に対する数値解析

続いて、拡張型ブジネスモデル (Nwogu, 1993) に基づく数値計算を行った。解析に用いた数値スキームは、スタガード格子に対して、Wei・Kirby (1995) の高次精度解法を適用し、さらに、差分近似の互換性と保存性を両立させるよう非線形項の扱いを改良 (梶島, 1999) したものである。計算に用いた海底地形を図-10 に示す。なお、図-10 以降の 3次元図では、鉛直方向スケールを拡大して表示している。水平部分の水深は、沖側で 20 m、岸側で 10 m であり、この間を 1/50 勾配の一樣斜面で接続した。中央部に幅 200 m、深さ 10 m の V 字型航路を配置し、港湾部では、波の入射方向と直角に防波堤を設置した。防波堤の開口幅 B は、250 m とした。航路の開始位置は、防波堤位置から沖側に向かって 1000 m の地点である。計算格子幅は 5.0 m、時間刻み幅は、0.1 s とした。

図-11 に、規則波 (造波波高 1.0 m、周期 12.0 s) に対する解析結果の例を示す。波が進行するにしたがって、航路部分での屈折により側方へと波が屈曲し、中央部が静穏化される様子が確認できる。なお、屈折波の反射により防波堤前面で波高が局所的に増大する箇所が現れる。波浪の屈折を基本原理とする V 字チャンネル工法自身には、入射波浪のエネルギー総量を減衰させる効果はない。このため静穏化領域を形成する代償として、波高が増幅する領域が現れる。この点は、屈折系の波浪制御手法に共通の課題であり、別途対応が必要である。

図-12 は、防波堤の開口幅 B を変化させて、防波堤前面および港内中央部での波高分布への影響を検討した例である。なお、比較のため、V 字チャンネルを設置しないケースも破線で表示した。V 字チャンネルを設置した場

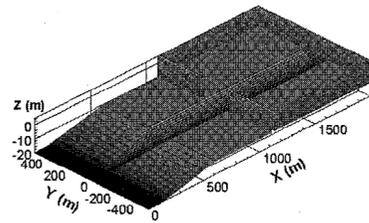


図-10 計算に用いた海底地形

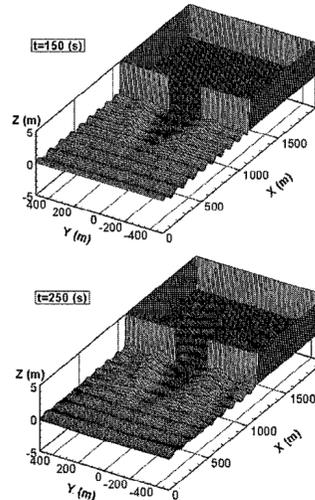


図-11 規則波に対する数値解析結果 (水面変位の空間分布)

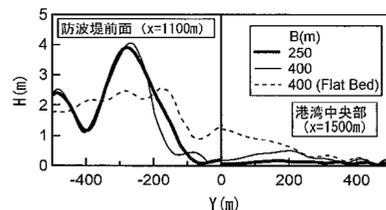


図-12 防波堤開口幅による波高分布の変化

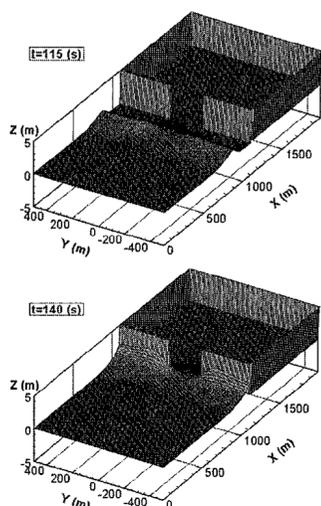


図-13 孤立波に対する数値解析結果(水面変位の空間分布)

合、今回の条件下では、開口幅をチャンネル幅の2倍とした場合でも港内が効果的に静穏化されている。ただし、許容される開口幅の最大値は、屈折波の港内進入を許さない範囲であり、V字チャンネルの長さ、深さ、幅や入射波長に応じて、ケースごとに設定する必要がある。

図-13には、孤立波(造波振幅1.0m)に対する解析結果の例を示す。規則波の場合と同様、屈折効果により航路部分が静穏化されている様子が確認できる。

6. おわりに

本研究では、船舶航路をV字型に掘削して波向きを制御することで航路・泊地の静穏化を図る工法を提示し、その適用性に関して、実験的・数値的な基礎検討を実施した。検討の結果、本工法により、港湾開口部からの侵入波を効果的に低減できることが確認された。

この波浪制御法は、航路海底部を深く掘削するだけであり、船舶航行の障害とならない。また、波の進入方向に向けて航路を作ることが可能となるため、船舶は横波を受けずに入港できる。コスト的な面に関しても、Kunitaら(2006)の初期検討によれば、海岸構造物の建設より有利となる。今後、広範な条件下での波浪制御効果やフレネル型レンズを模擬した非対称掘削の有効性、航路埋没対策としての効果、さらには、維持管理手法、周辺水環境への影響等について、研究を進めていく予定である。

謝辞：本研究の一部は、東亜建設工業(株)および若築建設(株)からの奨学寄附金の補助を受けた。また、V字チャンネル工法開発協議会の門司剛至氏(東亜建設工業)、上原功氏(若築建設)、岩田邦彦氏(ドラムエンジニアリング)からは、貴重なご助言をいただいた。水理

実験および数値計算にあたっては、中嶋光浩氏、参納千夏男氏、浜田昌明氏、坂高実氏(北陸電力)、越後満氏(北電技術コンサルタント)、平野真樹子さん、森田佳希君(当時金沢大学学部学生)に協力していただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 宇多高明・上森千秋・中条徳翁(1985)：海底掘削にともなう海浜変形，第32回海岸工学講演会論文集，pp. 410-414。
 梶島岳夫(1999)：乱流の数値シミュレーション，255p。
 鈴木康正・上原 功・富田康大・望月徳雄・平石哲也(1995)：フレネル潜堤による波向・波高変更効果に関する模型実験，海岸工学論文集，第42巻，pp. 701-705。
 武若 聡・入江 功・黒田 寛(1994)：テーパー型潜堤による波向き制御，海岸工学論文集，第41巻，pp. 726-730。
 土木学会編(1999)：水理公式集，713p。
 中村孝幸・竹本 剛(2001)：トレンチ工法による港内波浪の静穏化に関する研究，海洋開発論文集，第17巻，pp. 299-304。
 後野正雄・榎木 亨・小野正博・藤原隆一(1990)：人工海底地形による波向制御に関する実験的研究，海岸工学論文集，第37巻，pp. 589-593。
 Beltrami, G.M., P. Girolamo, and G. Pellegrini(2003)：Influence of dredged channels on wave penetration into harbors: The Malamoco Inlet case, Proc. 4th Int. Conf. Coastal Structures, ASCE, pp. 702-714。
 Berkoff, J.C. (1972)：Computation of combined refraction-diffraction, Proc. 13th Int. Conf. Coastal Structures, ASCE, pp. 471-490。
 Combe, A.J. and C.W. Soileau (1987)：Behavior of man-made beach and dune, Grand Isle, Louisiana, Proc. Coastal Sediments '87, ASCE, pp. 1232-1242。
 Demir, H., E.N. Otay, P.A. Work and O.S. Borekci (2004)：Impacts of dredging on shoreline change, J. Wtrwy., Port, Coast, and Oc. Engrg., ASCE, Vol. 130, No. 4, pp. 170-178。
 Horikawa, K., T. Sasaki, and H. Sakuramoto(1977)：Mathematical and laboratory models of shoreline changes due to dredged holes, J. Fac. Eng. Univ. Tokyo, Vol. 34 (B), pp. 49-57。
 Kunita, O., M. Yuhi, J. Yamazaki and M. Hamada (2006)：Numerical and Experimental Study on a New Wave-control Method using deeply dredged channel, Proc. 19th JASNAOE Ocean Engineering Symposium, Paper No. 47 (in CD-ROM), pp. 1-6。
 Lee, J.J. and R.M. Ayer (1981)：Wave propagation over a rectangular trench, J. Fluid Mech., Vol. 110, pp. 335-347。
 Li, Y.S., S.X. Liu, O.W. H. Wai and Y.X. Yu (2000)：Wave concentration by a navigation channel, Applied Ocean Research, Vol. 22, pp. 199-213。
 McDougal, W.G., A.N. Williams and K. Furukawa (1996)：Multiple-pit breakwaters, J.Wtrwy., Port, Coast. and Oc. Engrg., Vol. 119, No. 6, pp. 618-638。
 Nwogu, O. (1993)：Alternative form of Boussinesq equations for nearshore wave propagation, J.Wtrwy., Port, Coast. and Oc. Engrg., Vol. 122, No. 1, pp. 27-33。
 Radder, A.C. (1979)：On the parabolic equation method for water-wave propagation, J. Fluid Mech., ASCE, Vol. 95, pp. 159-176。
 Wei, G. and J.T. Kirby (1995)：Time-dependent numerical code for extended Boussinesq equations, J. Wtrwy., Port, Coast, and Oc. Engrg., ASCE, Vol. 121, No. 5, pp. 251-261。
 Williams, A.N. (1990)：Diffraction of long waves by a rectangular pit, J.Wtrwy., Port, Coast. and Oc. Engrg., Vol. 116, pp. 459-469。
 Zwamborn, J.A. and G. Grieve (1974)：Wave attenuation and concentration associated with harbor approach channels, Proc. 14th Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, pp. 2068-2085。