

静穏度解析における各種数値シミュレーションについて

水産土木研究室

〔問1〕 平面波浪場の解析手法には、さまざまな特徴を持つモデル方程式が使われていますが、静穏度解析に用いられる緩勾配方程式、非定常緩勾配方程式、数値波動法などのモデル方程式の特徴を説明して下さい。

〔回答〕 浅海域における波浪は、水深変化により浅水変形と屈折が起こる。防波堤などの構造物がある場合には、構造物前面で反射が起こるとともに、構造物背後に波浪がまわり込む回折が起こる。また、構造物が没水型や透過型であれば、波浪は構造物をとって透過（伝達）する。さらに、水深が波高と同程度になると、最も複雑な波浪変形である砕波が生じる。このように、波浪変形には浅水変形、屈折、回折、反射、透過（伝達）、砕波などの要素が含まれており、かつ実際の波浪は不規則性を有し、高波浪時には有限振幅性も無視できない。そこで、平面波浪場の解析にあたっては、波浪の不規則性と有限振幅性を取り入れた上で、波浪変形の全ての要素を考慮した解析手法が望ましいが、現在、各種静穏度解析に用いられている緩勾配

方程式、非定常緩勾配方程式、数値波動法などの解析手法は、波浪の不規則性・有限振幅性・波浪変形について、なんらかの制限が設けられているため、その適用範囲や計算精度などに留意することが重要である。さらに、使用プログラムや計算機の制約により、必要な精度を得るための条件を逸脱して計算を行うことがないように留意することも重要である。

平面波浪場のモデル方程式の基礎理論、適用範囲、数値計算法などをまとめた土木学会海岸工学委員会の報告書¹⁾にしたがい、モデル方程式の特徴を整理した。平面波浪場のモデル方程式の相互関係を示す模式図を図-1に示すとともに、モデル方程式の理論的適用範囲を表-1に示す。なお、本論で言及しない平面波浪場のモデル方程式や海浜流・3次元海浜変形の解析

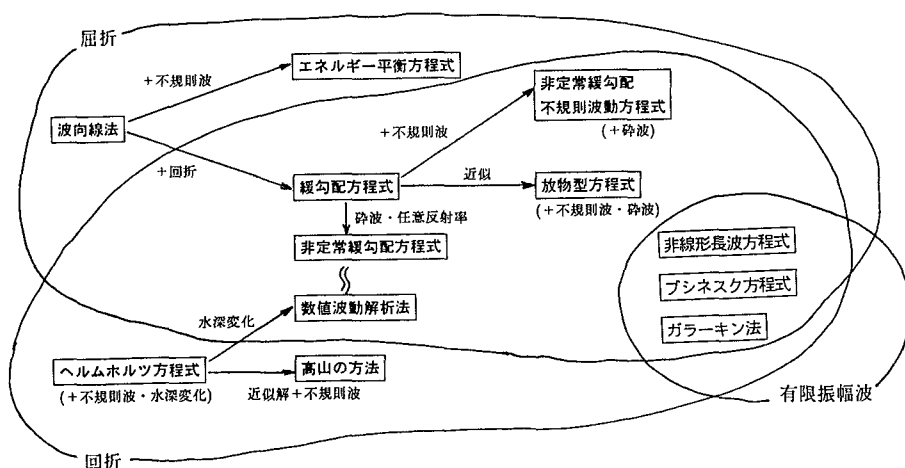


図-1 屈折と回折を基本としたモデル方程式の模式的関係図¹⁾

表一 平面波浪場のモデル方程式の理論的適用範囲¹⁾

分類	計算手法 (参考文献例)	浅水 変形	屈折	回折	反射	碎波 モデル	任意 水深	流れの 影響	不規則 性	有限 振幅性	計算領域			備 考
											広	中	狭	
屈折モデル	波向線法(屈折図法) (Keller, 1958)	◎	◎	×			◎	○	○	△	○	○	○	波速に有限振幅性を 含める
	エネルギー平衡方程式 (Karlssohn, 1969)	◎	◎	▽	△	○	◎	○	◎	×	○	○	○	
回折モデル	ヘルムホルツ方程式 (Gaillard, 1964)	○	○	◎	◎	×	◎	×	○	×			○	領域ごとに一様水深 のみ
	高山の方法 (高山, 1981)			◎	◎	×	◎	×	○	×		○	○	一様水深のみ
屈折・回折 モデル	緩勾配方程式 (Berkhoff, 1972)	◎	◎	◎	◎	○	◎	○	○	△			○	碎波モデル・境界条 件処理が容易
	非定常緩勾配方程式 (渡辺・丸山, 1984)	◎	◎	◎	◎	○	◎	○		×			○	
	数値波動解析法 (伊藤・谷本, 1971)	○	◎	◎	◎		◎			×			○	
	非定常緩勾配不規則波 動方程式(窪ら, 1991)	◎	◎	◎	◎	○	◎		◎	×			○	
	放物型波動方程式 (Radder, 1979)	◎	◎	◎	△	○	◎	○	○	△		○	○	
非線形波動 モデル	非線形長波方程式 (Keller ら, 1960)	◎	◎	◎	◎	○	×	◎	◎	◎			○	鉛直加速度が無視される 浅海域に限定される
	ブシネスク方程式 (Peregrine, 1967)	◎	◎	◎	◎	○	○	◎	◎	◎			○	原方程式は浅海域に 限定される
	ガラーキン法 (灘岡・中川, 1993)	◎	◎	◎	◎		◎		◎	◎			○	

◎：基本形で適用可能， ○：応用形で一般的適用可能， △：応用形で部分的適用可能
▽：基本理論では考慮されていないが実用上適用可能， 空白：研究により適用できる可能性あり，
×：適用不可能。

方法は、参考文献^{1),2)}を参照していただきたい。

(1) 緩勾配方程式

傾斜海浜上に港湾構造物が建設される場合、屈折と回折が同時に起こるが、以前は構造物周辺で回折のみ考慮し、それ以外で屈折のみ考慮することが便宜的に行われていた。Berkhoffにより導出された緩勾配方程式³⁾は、屈折と回折を同時に考慮した基礎方程式であり、非定常緩勾配方程式や放物型方程式など数々の変形された形を含めて、現在広範囲に用いられている。現在では、この緩勾配方程式に碎波モデルや波と流れの干渉効果を取込むことにより、波浪変形の要素をほぼ考慮した数値解析が可能となっている。緩勾配方程式は微小振幅波の仮定を設けているが、任意水深に適用でき、かつ1/3までの海底勾配に適用可能であり、浅水変形、屈折、回折、反射を取扱える。また線形方程式であるため、重ね合わせ法により不規則波への適用も可能である。

(2) 非定常緩勾配方程式

非定常緩勾配方程式は、2階の楕円型偏微分方程式である緩勾配方程式を1階の連立偏微分方程式に書き換えたものであり、理論的な仮定は緩勾配方程式とまったく同じである。理論的適用範囲は緩勾配方程式と同じであるが、碎波モデルの組み込み、開境界条件の処理が容易であり、浅海域で想定される波浪変形要素である浅水変形、屈折、回折、反射、碎波をすべて同時に取扱えるため、現在提案されている平面波浪場の計算手法のうち、最も適用範囲の広いモデルのひとつである。しかし、非定常緩勾配方程式では、計算領域のすべての水面変動と線流量を定常解が得られるまで計算する必要があるため、膨大な計算時間、計算容量を必要とすることが最大の難点であり、実務に適用する場合、現在のところ規則波としての取扱いのみである。

(3) 教値波動法

数値波動法は、非定常緩勾配方程式とほとんど

ど同じであるが、方程式中の係数が非定常緩勾配方程式と多少異なるため、波の基本的変形である浅水変形を合理的に評価できず、補正係数を用いる必要がある。数値波動法の適用範囲は非定常緩勾配方程式とはほぼ同じであり、実務においても多くの実績を有しているが、浅水度係数に関する理論的な側面から、非定常緩勾配方程式の方が優位にある。

(4) 放物型波動方程式

放物型波動方程式は、緩勾配方程式において局所的な波動場が進行波であると仮定することにより、楕円型偏微分方程式を放物型偏微分方程式で近似したものである。このため、数値

計算において、沖から岸に向かって順次解を求めていけるので、計算時間が大幅に短縮できる。放物型波動方程式は、浅水変形、屈折、回折への適用は可能であるが、反射が顕著な場合には適用できない。

(5) 非定常緩勾配不規則波動方程式

非定常緩勾配不規則波動方程式は、理論的な仮定は緩勾配方程式と同じであるが、異なる周波数成分を同時に取扱えるところが異なる。この方程式は、緩勾配方程式に基づいて不規則波の屈折、回折を直接的に解析するために導かれた方程式であり、不規則波に対する碎波モデルの組み込みも容易であるが、使用実績は少ない。

〔問2〕 港内静穏度や海浜流・3次元海浜変形問題を検討する際に用いられる平面波浪場の解析手法の利用にあたって、留意すべき点を説明して下さい。

〔回答〕 (1) 港内静穏度

港湾・漁港の港内静穏度は、船舶の入出港の安全性ならびに物揚場、岸壁での荷役稼働率の観点から決定され、所要の港内静穏度が確保できる港形と低反射型構造物が選ばれる。したがって、港内静穏度を算定する際は、港内で碎波を考慮する必要がない（港湾計画上、港内で碎波が起こる条件は無意味）ため、多方向不規則波の回折と反射を精度よく計算できるモデル方程式を選択することが重要である。多方向不規則波の回折、反射を精度よく考慮できるモデル方程式であれば、モデル方程式による差は少ないので、いずれの方法でもよい。ただし、小規模な漁港では碎波帯に構造物が設置されることが多く、港内静穏度と漁港周辺の波浪分布をあわせて議論する場合、数値波動法は碎波を取扱えないため、緩勾配方程式、非定常緩勾配方程式が有利である。

(2) 海浜流・3次元海浜変形

3次元海浜変形モデルは、平面波浪場と波浪場により起因される海浜流場を計算し、波と流れの諸量から各地点の局所的な漂砂量フラック

スを評価し、漂砂の連続式より地形変形を計算するモデルである。近年、3次元海浜変形モデルの実際問題への適用が行われ、現地適用性もある程度定量的に確認されつつある。したがって、海浜流や3次元海浜変形の解析には、碎波帯近傍に建設される離岸堤や人工リーフなどの海岸構造物は透過性の構造形式が多いため、多方向不規則波の浅水変形、屈折、回折、反射、透過（伝達）、碎波などの波浪変形のすべての要素を精度よく計算できることが重要である。したがって、海浜流・3次元海浜変形問題では、波浪変形のすべての要素を同時に取扱える緩勾配方程式、非定常緩勾配方程式が有利である。

不規則波では規則波に比べて平滑化されるため、モデル方程式間の差はあまり見られず、特に、海浜流場は平面波浪場に生じていたモデル方程式間の相違に比べるとかなり小さくなっている。したがって、海浜流や3次元地形変形問題では、モデル方程式の相違よりも、計算を不規則波として取扱うか否かが結果に大きく影響を及ぼす。

〔問3〕 モデル方程式の数値解法には、差分法と有限要素法などがありますが、どのような相違があるのか説明して下さい。

〔回答〕 モデル方程式の数値解法として一般的に差分法、有限要素法が使われるが、緩勾配方程式は有限要素法や差分法、非定常緩勾配方程式は差分法で解かれる場合が多い。それぞれの解法の特徴を表-2に示す。差分法と有限要素法は本質的には等価なものであるが、差分法がもとの微分方程式の変数のテイラー展開近似に基づくのに対し、有限要素法はもとの微分方程式をなんらかの方法で積分方程式に表現しなおした上で数値解法を行うところにある。差分法では計算格子は等間隔で格子状に組まれるが、有限要素法では任意の形・大きさの要素に分けて取扱うことができる。したがって、必要なところのみ要素を細かくすることが容易である。もちろん、差分法でも変間隔格子を用いることはできるが、一般的ではない。港内静穏度解析に限れば、両解法の差は逐次演算を行うか、あるいは行列演算を行うかなどの違いによる計算機の必要な記憶容量や計算時間の差ということになる。

結 語

静穏度解析には、緩勾配方程式、非定常緩勾配方程式、数値波動法などの解析手法が用いられるが、具体的な問題解決にあたり、それぞれの解析手法の特性、適用範囲などを検討した上で解析手法を選定することが重要である。解析結果の評価に際しては、①使用した解析手法が、現地波浪を精度よく再現可能なモデルであ

表-2 差分法とFEMの比較⁴⁾

	差 分 法	F E M
格 子 網	一般に等間隔格子 (長方形格子網)	任意の形・大きさの要素 (一般に三角形要素)
近 似 法	Taylor 展開 点近似・差分近似	変分原理 重みつき残差法, Galerkin 法, 面近似
演 算	逐次演算 (SOR) (行列演算)	行列演算
特 性	非線形 急激なまたは 不連続な変化	線形 (非線形) 局所の変化, 不均一・集中的変化 複雑な形の境界
有利な問題の例	衝撃波 乱 流	地下水 ポテンシャル流 拡 散
そ の 他		shape function を高度な関数形に選んで Crank-Nicholson, Lax-Wendroff 等の 差分形に帰着させることができる。

るのか、②碎波変形や波浪の不規則性、有限振幅性など、現地で問題となっている波浪変形の要素は考慮されているのか、③計算は規則波でよいのか、不規則波でよいのか、といった点に留意しつつ、解析対象港湾・漁港周辺の地形、波浪に対する技術経験に基づいて、解析結果の評価にあたることが重要である。

Q & A の最後にあたり、本論は土木学会海岸工学委員会研究現況レビュー小委員会「波・構造物・地盤の調査設計手法調査研究報告書」を参照し、記述したことを付記するとともに、内容のいたらぬ点は著者の責任であることを明記しておく。

(文責 明田定満)

参 考 文 献

- 1) 土木学会海岸工学委員会研究現況レビュー小委員会：波・構造物・地盤の調査設計手法調査研究報告書，1993.
- 2) 本間 仁監修，堀川清司編：海岸環境工学，東京大学出版会，1985.
- 3) Berkhoff, J. C. W: Computation of combined refraction-diffraction, Proc. 13th Int. Conf. on Coastal Eng., pp, 471-490, 1972.
- 4) 土木学会編：土木工学における数値解析/流体解析編，サイエンス社，1974.