汀線変動に対する線形応答モデルの現地データへの適用

Application of Field Data in Linear Response Model of Shoreline Variation

TRUONG Thien Khang¹ • 田中 仁²

Thien Khang TRUONG and Hitoshi TANAKA

There are many kinds of model for predicting shoreline variation nowadays, which can be divided into two groups: process-based modeling (which is usually based on the sediment transport process and external forces) and another is mostly based on engineering computations which are not considered about the sophisticated or physically rigorous sediment transport process. One of the advantages of these models is short computing time due to not consider about sediment transport process. However, determination of empirical coefficients is the problems of these models. In this study, by applying long-term high-frequency field data on Sendai Coast with analytical analysis, a model for predicting the response of shoreline has been developed and verified.

1. はじめに

海浜における地形変化を予測するモデルとして、これ まで多くのものが提案されている。海浜変形モデルに限 らず,ある物理現象を表現するためのモデルとして,一 般的に物理過程を反映したモデルとブラックボックスモ デルに分類されることが多い. 岸沖漂砂に伴う海浜変形 を扱うモデルに関しては,後者に分類されるモデルとし て砂村 (1980),加藤ら(1988)などが提案されている. また、坂上・田中(2005)、加藤ら(2007)は短期間の汀線 変動に対してニューラルネットワークの応用を検討して いる. 近年, 著者らはDavid · Dean(1993)と同様に畳み 込み積分を応用したモデルを提案している(Truong・田 中, 2007). ただし, これらのモデルには経験的に定め られなければならない係数等が含まれている.ただし, ブラックボックスモデルは複雑な波浪場・土砂移動の計 算などを含まないため、計算時間がきわめて短いなどの 利点を有している.

本研究ではTruong・田中(2007)のモデルと同様に汀線 変動を線形応答系と仮定することにより,畳み込み積分 を応用した岸沖漂砂による汀線応答モデルを提案する. さらに,外力条件として正弦的変化および一定条件のも とでの解析解を導いた.ここで,本モデルは線形である ことから,外力に対してフーリエ級数展開を施し,基本 解の重ね合わせにより,任意の外力条件の解を解析的に 得ることが出来る点に特徴がある.そこで,現地データ として仙台海岸における高頻度実測データを用い,モデ ル中の経験定数を決定した.

2. 汀線変動モデル

1 学生会員 修(工)東北大学大学院 工学研究科 2 フェロー 工博 東北大学大学院教授 工学研究科 一定の水位・波浪条件のもとで長時間にわたり波浪を 作用させると、平衡海浜断面に至ることが知られている. このような事実から、本研究においては任意時刻*t*にお ける汀線位置*y*(*t*)を求めるためのモデルの基礎式として、 David・Dean(1993)と同様に次の様な積分型の式を用い る.

$$y_s(t) = a \int_0^t \{C_0 - C_s(\tau)\} \{1 - e^{-(t-\tau)/T_s}\} d\tau \qquad (1)$$

ここで、 $a:定数, Ts:海浜応答の時定数である.また, 式(1)中の<math>C_s$ 値はSunamura・Horikawa(1974)により提案 された次の無次元パラメータである.

$$C_{s} = \left(\frac{H_{0}}{L_{0}}\right) / \left\{ (\tan\beta)^{-0.27} \left(\frac{d}{L_{0}}\right)^{0.67} \right\}$$
(2)

ここで, H_{a} : 沖波波高, L_{a} : 沖波波長, $\tan \beta$: 海浜勾配, d: 底質粒径である. さらに,堆積型海浜形状・侵食型 海浜形状の境界に対応する C_{a} 値が C_{b} である.

なお,前報(Truong・田中, 2007)においては式(1)の 被積分関数の二つ目の{}内を1-e^{vn}と表現したが,後述 する通り,式(1)の表現がより適切である.

3. 汀線応答の基本解

以下では、まず、正弦的外力および一定外力時の解析 解を示す.これにより、任意の外力に対しては、フーリ エ級数展開を用いて基本解の線形重ね合わせにより容易 に解を求めることが出来る.

(1) 正弦変動外力時の応答

ここでは、周期的な外力変化を次式のように正弦関数 で表現することとする。

$$C_0 - C_s(t) = A \sin\left(\frac{2\pi}{T_D}t\right) = A \sin(\sigma t) \qquad (3)$$

ここで, *T*_b:波浪条件変化の周期, *A*:振幅, σ:角振 動数である. 無次元パラメータ*C*₀-*C*₀の変化を図-1の上 段に示す.



式(3)を式(1)に代入し, 無次元の汀線変化 y.* を求める ことができる. その結果を式(4)に示す.

$$y_{s}^{*}(t) = \frac{2\pi y_{s}(t)}{aAT_{D}} = 1 - \frac{1}{1+\beta^{2}} \left(\beta \sin \sigma t + \cos \sigma t + \beta^{2} e^{-\sigma t/\beta}\right)$$

$$= 1 - \frac{\beta^{2}}{1+\beta^{2}} e^{-\sigma t/\beta} - \frac{1}{\sqrt{1+\beta^{2}}} \sin (\sigma t + \theta)$$
(4)

ここで、 θ :位相差であり、また、 β は次式で定義される海浜応答時間スケールと波浪作用時間の比である.

$$\beta = \sigma T_s = 2\pi \frac{T_s}{T_D} \tag{5}$$

図-1の下段は波浪条件と式(4)の無次元汀線位置 y^* , との関係である. 無次元パラメータ C_0 - C_s の正負によって, 汀線の前進・後退が現れることが確認される. 特に, C_0 - C_s が負に変化した時に汀線後退に転じており, 前報 (Truong・田中, 2007)の計算結果に比べ, C_s の特性が 反映された結果になっている.

図-1の下段からわかるように,時間 t が大きくなるに つれ,汀線は波浪変化と同様に正弦関数的に変動してい る.また,無次元パラメータβの大小によって汀線変動 が異なる.βが大きいときに波浪の最大値と最大汀線変 化量との間の位相のずれθが大きくなる.

図-2と図-3は最大汀線変化量y,*_{smax}と位相ずれについ て,無次元パラメータβとの関係を表したものである. 同じ波浪作用では,βが小さいほど外力の影響は長く持 続するため,最大汀線変化量が大きくなり,また,この 時,最大汀線変化量の位相のずれが小さくなる.

(2) 一定外力条件での応答

次に,一定の外力条件として以下のような関数と仮定 する.

$$C_0 - C_s(t) = -A_0$$
 $0 < t < T_E$ (6)
ここで、 T_E : 一定外力の継続時間である.上式を式(1)







に代入すれば,先の場合と同様に,無次元汀線変化量を 求めることができる.

$$y_s^*(t) = \frac{y_s(t)}{aA_0T_s} = 1 - exp\left(-\frac{1}{\gamma}\frac{t}{T_E}\right) - \frac{1}{\gamma}\frac{t}{T_E}$$
(7)

ここで、 $\gamma = T_s/T_{\epsilon}$ は汀線応答の時間スケールと波浪作用 時間の比である.式(7)により得られる無次元汀線変化 過程を図⁻⁴に示す.式(7)から分かるように、汀線応答 は指数関数に従っており、 t/T_{ϵ} で最大汀線変化量になる. また、 γ の大小により、最大汀線変化までに到る時間の 長さが変化する.

図-5は γ の比と最大汀線変化量 $y_s *_{smax}$ との関係を表したものである.汀線の変化量が最大汀線変化量の99%まで変化するのに必要とする時間を t_{59} とし、 $\gamma \ge t_{59}/T_{\varepsilon}$ との関係を図-6に示した.









図-6 $\gamma \ge t_{99}/T_E \ge 0$ 関係

- 4. 仙台海岸の実測データへの適用
- (1) 実測データの概要



図-7に示すように実測地点は仙台新港から南に約 2.5kmの場所である.以下のC,値の計算においては,波 浪データとして仙台港におけるナウファスを利用した. また,海浜勾配,底質粒径には実測された一定値を使用 した.また,砂村(1980)をもとにC₀=18とした.

短期的スケールでの海浜変形の機構を解明するために, 高頻度で地形測量が行われる事例がある(例えば,加藤 ら,1988;松富ら,2000;加藤ら,2007).式(1)に含ま れるモデル定数*T*,,*a*の決定にはこのような高頻度の信 頼度の高いデータを選択することが望ましい.そこで, 本研究では著者の一人による仙台海岸の実測データ(姜・ 田中,2006)を用いる.これを含む複数の測点において 汀線位置が定期的に測定されている.ただし,実測デー タには沿岸漂砂の影響も含まれているために,これを経 験的固有関数により展開し,岸沖漂砂による成分を取り 出したデータを使用した.

(2) 外力変化のフーリエ級数展開

前述の線型モデルにおいて,外力条件が正弦波および 一定条件での解析解が得られたので,任意の外力に対し ては、フーリエ級数展開を用いて基本解の線形重ね合わ せにより容易に解を求めることが出来る.図-8は1997年 5月の波浪条件のフーリエ級数展開結果を示す.図-8の 上段は実際の波浪条件でのC。値であり,下段はそれぞれ 1,2,3,6成分までを重ね合わせた結果である.これよ り、6成分まで重ね合わせることにより,Co-C。値が実際 の条件とほぼ一致していることが確認される.

(3) モデル定数の決定

図-9は1997年5月の波浪条件に対する汀線応答を示したものである。まず,波浪条件から計算された C_i 値の平均値を代表値として与え,一定外力条件の解析解を適用した。初期条件は1997年5月10日の汀線位置である。図-9の実線はこの計算結果であり,実測データ(\triangle)と良い一致を示している。この計算から,時定数 T_i =69hrと係数a=0.06m/dayを得た。一方,外力の第6成分までのフーリェ成分の重ね合わせによる解は破線であり,上述





した一定の波浪条件での計算結果との差は小さいことを 確認することができる.図-8においてはC>C。であるこ とから,図-9では汀線が後退している.また,重ね合わ せの解においては,C-C。の変動に応じて汀線にも幾分 の変動が見られる.

(4) モデルの検証計算

上記の手法により得られた定数*a*, *T*,を用い, 同様の 方法で別の侵食期間を対象に検証計算を行った. データ は1999年9月から11月に得られたものであり, 上記のキャ リブレーション計算よりも長い期間の観測値である.

図-10の上段の実線はこの期間の毎日の日平均波浪条

件から計算されたC.値を示し、一方、破線はこの短期間のC,値の平均値を表す.図示された日毎のC,値からフーリエ級数展開を行い、再合成した結果を同図中段に示す.

図-10の下段の実線は入力条件を一定値で与えた場合 であり、破線は外力のフーリエ級数展開をもと基本解を 重ね合わせた結果である.ここでは、図-10中段の結果 をもとに、第37成分までを重ね合わせた.実測と計算結 果の間には幾分差違が見られるものの、いずれの計算方 法も変化の傾向を捉えている.これより、ここに提案し たモデルの係数は信頼度が高いと考えられる.

なお,本論文においては計算事例として汀線後退の見 られた二つのケースを示したが,当然,汀線前進の場合,



図-10 検討計算の外力条件と計算結果(1999年9月~11月)

さらには、両者が混在する場合への適用も可能である.

5. おわりに

本研究では、汀線変動過程を線形力学系と仮定し、 Sunamura・Horikawa (1974)のCパラメータで表現され た波浪条件が正弦波および一定値の場合の汀線応答に関 する基本解を導いた.これにより、外力条件をフーリェ 級数展開し、上記の基本解を重ね合わせることで、任意 の外力条件での解を得ることができる.さらに、仙台海 岸での実測値との比較により、モデル定数を決定するこ とができた.

参考文献

加藤一正・柳島慎一・村上裕幸・末次広児(1988):短期汀線 変動のモデル化の試み,海岸工学論文集,第35巻, pp.297-301.

加藤 茂・若江直人・青木伸一(2007): ニューラルネット

ワークを併用した順応的管理のための汀線モニタリング 法の検討,海岸工学論文集,第54巻, pp.656-660.

- 姜 炫字・田中 仁 (2006): 汀線変化モデルの漂砂量係数同 定に及ぼす検証データの影響,海岸工学論文集,第53巻, pp.556-560.
- 坂上 毅・田中 仁 (2005): ニューラルネットワークを用い た海浜変形予測の試み,海岸工学論文集,第52巻, pp.531-535.
- 砂村継夫(1980):自然海浜における汀線位置の時間的変化に 関する予測モデル,海岸工学論文集,第27巻, pp.255-259.
- Truong Thien Khang 田中 仁 (2007):線形応答関数を用い た汀線変動の予測モデル,海岸工学論文集,第54巻,pp. 621-625.
- 松冨英夫・金光紀代太・富樫宏二(2000):秋田県南部海岸に おける汀線位置変化の基礎的検討,海岸工学論文集,第 47巻, pp.666-670.
- David, L.K. and R.G. Dean (1993): Convolution method for timedependent beach-profile response, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol.119, No.2, pp.204-226.
- Sunamura, T. and K. Horikawa (1974): Two-dimensional shore transformation due to waves, Proc. 14th Conf. Coastal Engineering, pp.920-938.