

數值模型에 의한 海岸斷面變化의 豫測

조 흥 연*, 이 길 성*

1. 연구의 목적 및 내용

해안지형이 표사이동으로 인하여 변화되는 주요 원인은 인위적 요인(예를 들면, 해안구조물의 설치, 토사채취, 하상준설 등에 의한 표사이동의 차단, 표사이동량의 변동 등)과 자연적 요인(예를 들면, 해안환경-기압, 바람, 조석 등-변화에 따른 해수면 변화, 파랑내습 등에 의한 표사이동과 표사량 분포의 변화 등)으로 구분된다(CERC, 1984). 강한 에너지를 수반하는 폭풍·태풍 등에 의한 해안지역의 과도한 침식·퇴적은 해안의 위락기능 저해, 해안구조물의 기능저해 및 안전에 대한 위험을 초래하기 때문에 파랑에 의한 표사이동량과 이동방향을 적절하게 예측하는 수치모형의 개발이 필요하다. 파랑변형, 표사이동, 수위변동 등을 종합적으로 고려해야 하는 해안지형의 변화에 관한 연구는 시간·공간 축적상에서 장기 단기간의 해안지형 변화로 구분되며, 각각은 연안표사 이동량, 종단표사 이동량과 연결되어 수행되었다.

Swart(1974, 1976)는 평형단면 - 파랑조건(파고 및 주기)이 충분히 긴 시간동안 일정하게 유지될 경우 도달하게 되는 안정된 해안단면 - 개념에 근거하여 조석에 의한 수위변동으로 야기되는 단면변화를 예측하는 수치모형을 개발하였으며, Wang 등(1975), Wang(1977)은 대상해역을 기파대(surf zone), 원빈(offshore)지역으로 구분하여 해안지형변화를 예측하는 3차원 수치모형을 개발하였으나 표사이동이 활발한 기파대에서의 적용이 곤란한 단점이 있다. Felder와 Fisher(1980), Kriebel과 Dean(1985), Nishimura와 Sunamura(1986), Larson과 Kraus(1989), Larson 등(1990)도 대상해역을 파랑특성, 표사이동 특성에 의하여 구분하고 각각 별도의 파랑변형모형, 표사량산정식 등을 사용하여 해안지형변화를 예측하였다. 반면, Shibayama와 Horikawa(1980)는 소류사만을, Dally와 Dean(1984)은 부유사만을 고려하여 각각 해안지형변화를 예측하였다.

본 연구에서는 쇄파대내에서의 종단방향의 파랑변형모형, 표사량 산정과 표사의 이동방향 추정, 표사량 보존방정식에 의한 수심변화 예측모형으로 구성된 수치모형을 이용하여 주어진 파랑조건하에서의 해안지형변화를 예측하고, 그 결과를 Kraus와 Larson(1988)의 보고서에 제시된 실험결과와 비교함으로써 모형의 타당성을 입증하고자 한다.

2. 해안단면변화 예측모형의 구성

기파대에서는 쇄파에 의하여 발생하는 강한 난류에 의한 유체의 불연속성으로 인하여 적용할 수 있는 파이프론이 없으나, 현장관측 및 실험을 통하여 이 지역에서의 파랑변형을 추정할 수 있는 여러 모형이 제안되어 왔다.

* 서울대학교 토목공학과 (Dept. of Civil Eng., Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea)

본 연구에서는 에너지 플럭스(F)의 변화율이 에너지 감쇄율(D)과 동일하다는 가정하에 구성된 모형중 다중 사주 형성의 원인이 되는 다중쇄파를 모의할 수 있도록 파의 재형성(wave reformation)을 고려한 Dally 등(1984)의 모형을 채택한다. 본 모형의 적용시에는 다중사주형성을 모의하지는 않았으나 Dally 등의 모형은 다중쇄파로 인한 다중사주형성을 모의할 수 있는 장점이 있다(Larson et al., 1989). 위 모형의 지배방정식은 식 (1)과 같으며 1차원 종단방향만을 고려할 경우 식 (2)와 같이 간단하게 된다.

$$\text{div.}(F) = -D \text{-----} (1)$$

$$\partial F_x / \partial x = -D \text{-----} (2)$$

여기서, D = the energy dissipation rate(= α/d)($F_x - F_s$) in this model),
 F_x = the energy flux(= EC_g , $E = \rho g H^2 / 8$),
 C_g = the group velocity(= nC),
 C = the wave celerity,
 n = the ratio of the group velocity to the wave celerity,
 F_s = the stable energy flux(= $E_s C_g$, $E_s = \rho g H_s^2 / 8$),
 H = the wave height,
 H_s = the stable wave height(= Γh),
 Γ, α = the empirical parameters,
 d = the total water depth(= h + η),
 h = the water depth,
 η = the period-avearged water surface displacement,
 x = the coordinate of seaward direction이다.

또한, 라디에이션 응력(radiation stress) 개념에 의하여 평균수위 η 의 변동을 예측하는 식은 2차원의 경우 식 (3)과 같으며(Mei, 1983), 종단방향만을 고려한 1차원 모형의 경우는 식 (4)와 같이 간단하게 된다.

$$\partial S_{ij} / \partial x_i = -\rho g (h + \eta) \partial \eta / \partial x_j \text{-----} (3)$$

$$\partial S_{xx} / \partial x = -\rho g (h + \eta) \partial \eta / \partial x \text{-----} (4)$$

여기서, S_{xx} 는 파랑진행방향(종단방향)의 라디에이션 응력이고, 선형파이론에 의하면 $S_{xx} = E(2n - 1/2)$ 로 표현될 수 있으며, 식 (3), (4)에 사용된 변수는 식 (1), (2)에서와 동일하다. 기파대내에서의 파고 H와 평균수위 η 는 식 (2), (4)에 의하여 계산된다.

종단방향의 표사이동에 관한 연구는 표사와 유체의 불연속성, 표사이동 복잡성(complexity) 등 때문에 이론적인 접근이 사실상 불가능하므로, 종단 표사량의 산정식과 표사의 이동방향은 현장관측 및 실험결과에 의존하고 있다. 본 연구에서는 종단방향의 파랑변형모형 식 (2)와 (4)를 이용하여 계산된 파랑자료(D, dh/dx , D_{0q} (후술))에 의하여 표사량을 예측하는, 즉 표사량을 에너지 감쇄율에 의하여 계산하는 산정공식을 사용하고, 표사의 이동방향은 이동방향예측의 인자인 침강속도 w를 고려한 기준, 즉 Larson과 Kraus(1989)가 실험자료에 의하여 제안한 기준을 사용한다. 본 모형에서의 표사량 산정공식은 식 (5)와 같으며, 식 (2), (4)의 결과로부터 전 지역에 서의 표사량을 계산할 수 있다.

$$q = K[D - D_{0q} + (\epsilon/K)(dh/dx)] \text{-----} (5)$$

여기서, q = the transported sediment vol. per unit width and time,
 K, ε = the empirical parameters,
 D_{0q} = the equilibrium energy dissipation rate
 (= $5\rho g^3/2\gamma^2 A^3/2/24$),
 γ = the breaker index(= H_b/h_b),
 H_b = the breaking wave height,
 h_b = the breaking water depth,
 A = the shape parameter이다.

식 (5)에 의한 표사량의 산정은 기파대에만 적용되므로 포말대(swash zone), 원빈 등의 지역에서는 Larson 등(1990)이 제안한 산정공식을 이용한다. 이 산정공식은 원빈에서는 지수함수, 포말대에서는 선형함수의 형태로서, 식 (5)에 의하여 계산된 표사량의 경계값을 이용하여 기파대를 제외한 지역의 표사량을 계산한다.

단위체적내에서의 질량보존법칙을 이용하면 식 (6)과 같은 해안지형의 표사량 보존법칙이 얻어지며, 1차원 종단방향 모형의 경우 식 (7)과 같이 단순화된다. 표사이동에 의한 수심변화는 식 (7)을 이용하여 계산한다.

$$\partial h/\partial t = \partial q_x/\partial x + \partial q_y/\partial x \text{ ----- (6)}$$

$$\partial h/\partial t = \partial q_x/\partial x \text{ ----- (7)}$$

여기서, q_x 는 식 (5)에서 정의한 q 와 동일하다.

3. 수치모형에 의한 수심변화의 예측

수치모형(Larson and Kraus, 1989)에 의한 해안단면 변화를 계산하기 위한 입력자료는 Kraus와Larson(1988)의 보고서 자료중 CASE 300을 사용하였으며, 모형의 수행에 필요한 입력자료, 입력매개변수는 다음과 같다.

- 입사파고 $H = 1.28(m)$,
- 주기 $T = 11.33(sec)$,
- 심해파형경사 (H_0/L_0) = 0.0054,
- 외해수심(조파기 flat section의 수심) $h = 4.57(m)$,
- 침강속도 $w = 5.9(cm/sec)$,
- 단면형태 매개변수 $A = 0.13(m^{1/3})$,
- 중간입경 $d_{50} = 0.40(mm)$,
- 공간 증분 $\Delta x = 1.2192(m)$,
- 시간 증분 $\Delta t = 300(sec)$,
- 점성계수 $\nu = 1.20 \times 10^{-6}(m^2/sec)$ (by the given temperature, 12°C),
- 경험 상수 $\alpha = 0.15$,
- 경험 상수 $\Gamma = 0.4$,
- 경험 상수 $K = 1.1 \times 10^{-6}(m^4N/sec)$,
- 경험 상수 $\varepsilon = 0.0016(m^2/sec)$.

위 입력자료에 의하여 얻어진 결과를 분석한 내용은 다음과 같다.

FIG. 1은 종단방향의 파고변동을 시간별로 나타낸 그림으로 사주가 형성되면서 쇄파점이 외해방향으로 이동하고 있으나, 쇄파파고는 변동이 없음을 알 수 있다. FIG. 2는 전 구간에서의 표사량분포 $q(x)$ 를 시간별로 나타

넌 그림으로 시간이 지날수록 표사량이 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 기파대의 표사량이 전체이동 표사량의 대부분을 차지하고 있으며 이 영역에서의 표사이동이 매우 활발함을 알 수 있다. 또한 시간이 지남에 따라 전체 표사량이 감소(대략, 지수형태의 감소)하는 것은 평형상태로 진행하고 있음을 보여준다.

FIG. 3은 5시간, 10시간이 경과하였을 때 계산된 해안단면이고, FIG. 4는 측정된 해안단면을 보여주는 것으로 계산된 결과(FIG. 3)와 많은 차이가 있음을 알 수 있으나 사주의 형성을 재현하는 측면에서는 정성적인 일치를 보이고 있다. 계산치와 관측치는 표사량 자체의 예측에 많은 차이를 보이고 있을 뿐 아니라 포말대에서의 표사량 예측에 무리가 있음을 알 수 있다. 포말대의 표사가 사주가 형성되는 경우에는 사주형성을 위한 표사공급원이라는 점에서 이 지역의 표사량 예측에 관한 많은 연구가 수행되어야 할 것이다.

실험치와 계산치와의 상이한 결과를 극복하기 위하여 본 모형에서는 우선 표사량 산정에 관련된 매개변수 K를 변화시키면서 수심변화를 계산하였다. FIG. 5는 매개변수 K의 변화에 따른 수심변화를 나타낸 것으로 매개변수의 변화는 사주 근처 지형의 기하학적인 형태를 결정하고 있음을 알 수 있다. 또한 포말대에서의 표사량 분포를 제곱근 함수로 가정하여 수심변화를 계산하였다. FIG. 6은 위의 가정하에서 계산된 단면으로 포말대에서의 침식단면형태를 결정함을 알 수 있다. 위의 사항을 종합하여(포말대에서의 제곱근함수형태의 표사량 가정, $K=8.7 \times 10^{-6} \text{m}^4 \text{N/sec}$ 값 이용) 계산한 해안단면은 FIG.7로 FIG. 3에 비해 실험치에 보다 근사함을 알 수 있다.

4. 결론 및 향후 연구과제

본 연구를 통하여 얻어진 결과는 다음과 같다.

- (1) 기파대에서의 표사량은 에너지 감쇄율과 관련성이 있으며, 이 지역의 표사이동은 쇄파로 인하여 매우 활발함을 알 수 있다.
- (2) 포말대 및 원빈영역의 표사량 산정을 특정 함수 형태로 가정하여 계산하는 것은 물리적인 의미가 결여되어 있으므로 이 지역의 표사량 산정을 위한 물리적인 접근 방식의 도입이 필요하다.
- (3) 파랑 특성, 표사이동 특성에 따라 해안지역을 구분하여 표사이동과 수심변화를 예측하는 방법은 경계에서의 불연속성 처리 등을 고려하여야 한다.

많은 파랑변형모형, 표사량 산정모형, 수심변화 예측모형 등을 종합하여 해안단면변화를 예측하는 연구는 본 모형에서와 같이 파랑변형을 중심으로 에너지 감쇄율과 관련하여 추정하는 방법과, 저면에서의 전단응력 및 저면유속과 관련하여 추정하는 방법이 있다. 종단방향의 표사이동에 따른 사주형성은 undertow의 발생에 따른, 즉 파랑에 의한 흐름발생의 측면에서 고찰하는 방법이 연구되어야 할 것이며, 포말대에서의 표사량이동에 관한 기존 해안단면변화 모형과의 비교를 통하여 본 모형을 수정·보완하여야 할 것이다.

5. 參考文獻

Coastal Engineering Research Center, Shore Protection Manual, U.S. Army Corps of Engineers, 1984.

- Dally, W. R. and R. G. Dean, Suspended sediment transport and beach profile evolution, ASCE, J. of WPCOE, Vol.110, No.1, 1984.
- Dally, W. R., Dean, R. G. and R. A. Dalrymple, A model for breaker decay on beaches, Proc. of 19th ICCE, pp.82-98, 1984.
- Felder, W. N. and J. S. Fisher, Simulation model analysis of seasonal beach cycles, Coastal Eng., Vol.3, pp.269-282, 1980.
- Kraus, N. C. and M. Larson, Beach profile change measured in the tank for large waves, 1956-1957 and 1962, Technical Report, CERC-88-6, 1988.
- Kriebel, D. L. and R. G. Dean, Numerical simulation of time-dependent beach and dune erosion, Coastal Engineering, Vol.9, pp.221-245, 1985.
- Larson, M. and N. C. Kraus, SBEACH : Numerical model for simulating storm-induced beach change ; Report 1 : Empirical foundation and model development, U.S. Army Corps of Engineers, Technical Report CERC-89-9, July, 1989.
- Larson, M., Kraus, N. C. and M. R. Byrnes, SBEACH : Numerical model for simulating storm-induced beach change ; Report 2 : Numerical formulation and model tests, U.S. Army Corps of Engineers, Technical Report CERC-89-9, May, 1990.
- Larson, M., Kraus, N. C. and T. Sunamura, Beach profile change : Morphology, transport rate, and numerical simulation, Proc. of 21st ICCE, pp.1295-1309, 1988.
- Mei, C. C., The applied dynamics of ocean surface waves, Chap.10, John-Wiley & Sons, 1983.
- Nishimura, H. and T. Sunamura, Numerical simulation of beach profile changes, Proc. of 20th ICCE, pp.1444-1455, 1986.
- Shibayama, T. and K. Horikawa, Bed load measurement and prediction of two-dimensional beach transformation due to waves, Coastal Eng. in Japan, Vol.23, pp.179-190, 1980.
- Swart, D. H., A schematization of onshore-offshore transport, Proc. of 14th ICCE, pp.884-900, 1974.
- Swart, D. H., Predictive equations regarding coastal transports, Proc. of 15th ICCE, pp.1113-1132, 1976.
- Wang, H., Modelling of short-term beach processes, unpublished Lecture Note, Univ. of Tokyo, 1977.

Wang, H., Dalrymple, R. A. and J. C. Shiau, Computer simulation of beach erosion and profile modification due to waves, Proc. of the Symposium on Modelling Techniques, ASCE, pp.1369-1384, 1975.

Watanabe, A., Numerical models of nearshore currents and beach deformation, Coastal Engineering in Japan, Vol.25, pp.147-161, 1982.

Watanabe, A. and M. Dibajnia, Numerical modelling of nearshore waves, cross-shore sediment transport and beach profile change, Symp. on Mathematical Modelling of Sediment Transport in Coastal Zone, 1988.

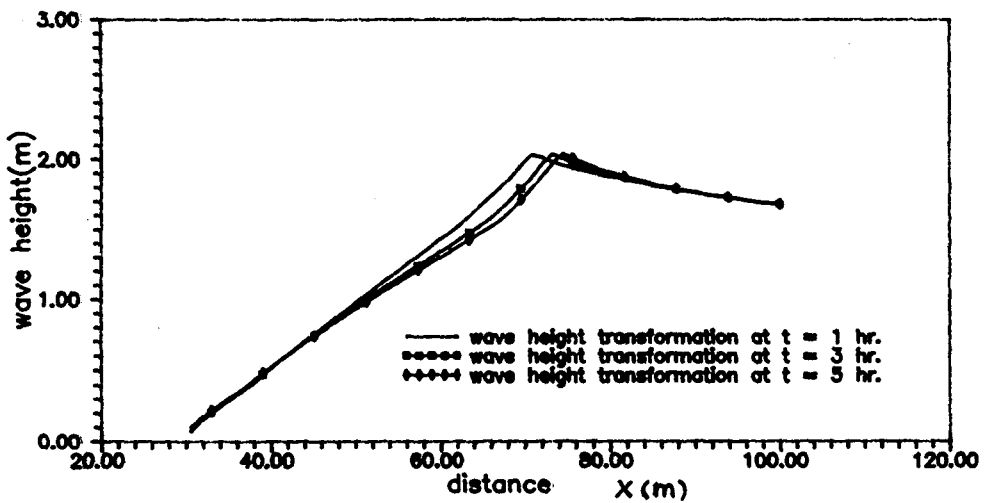


FIG. 1 Wave height transformation at t = 1,3,5 hr.

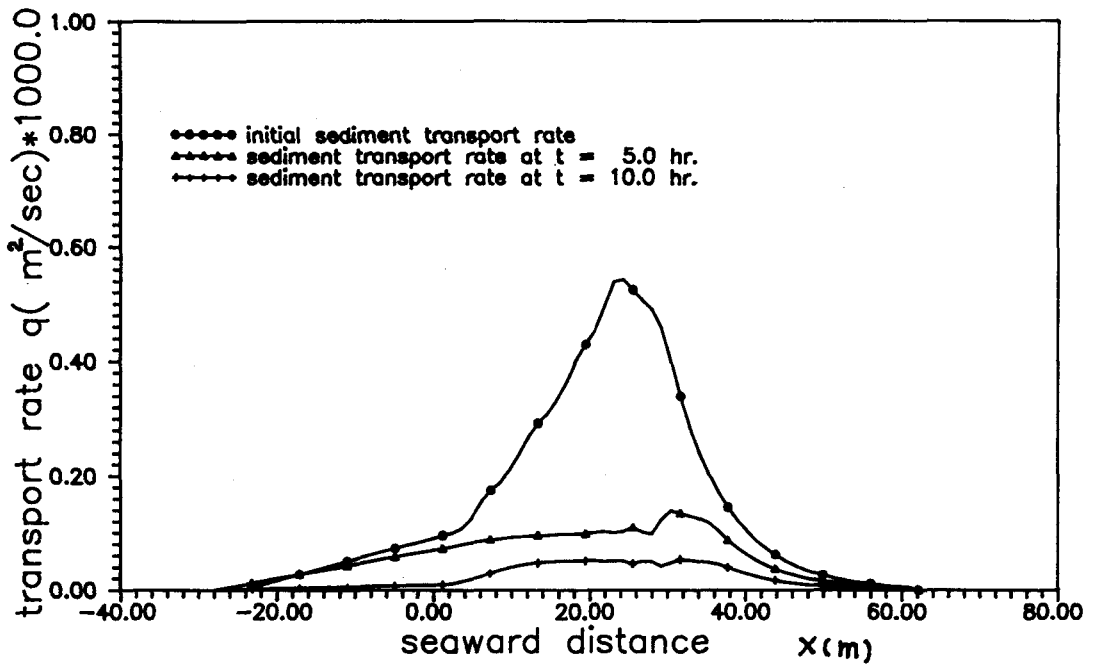


FIG. 2 Distribution of on-offshore sediment transport rate.

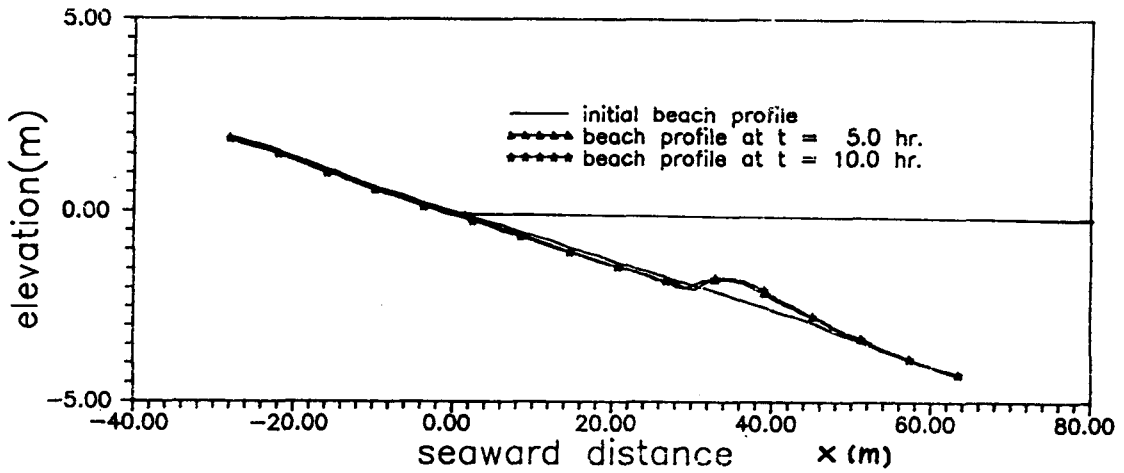


FIG. 3 Computed beach profile change at $t = 5, 10$ hr.

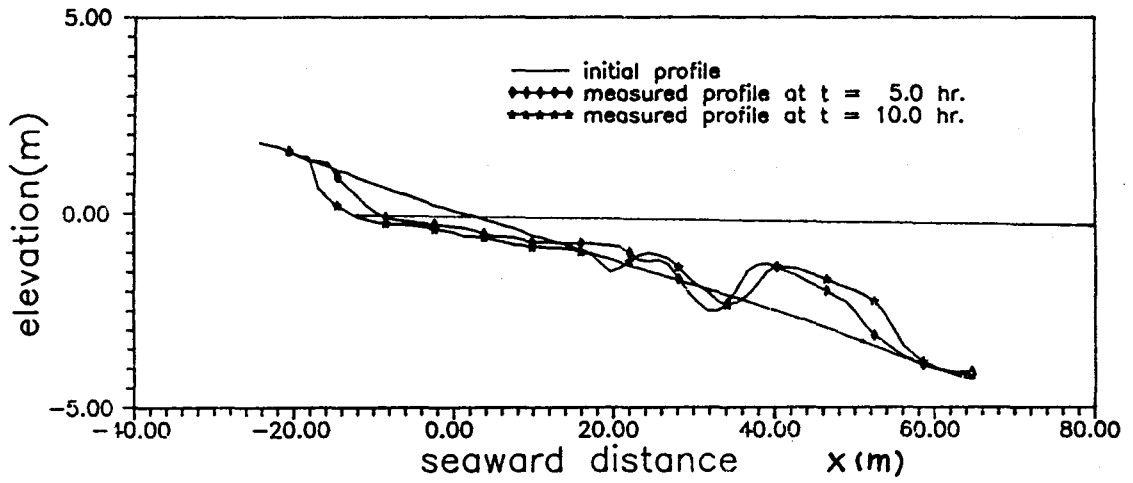


FIG. 4 Measured beach profile change at $t = 0, 5, 10$ hr.

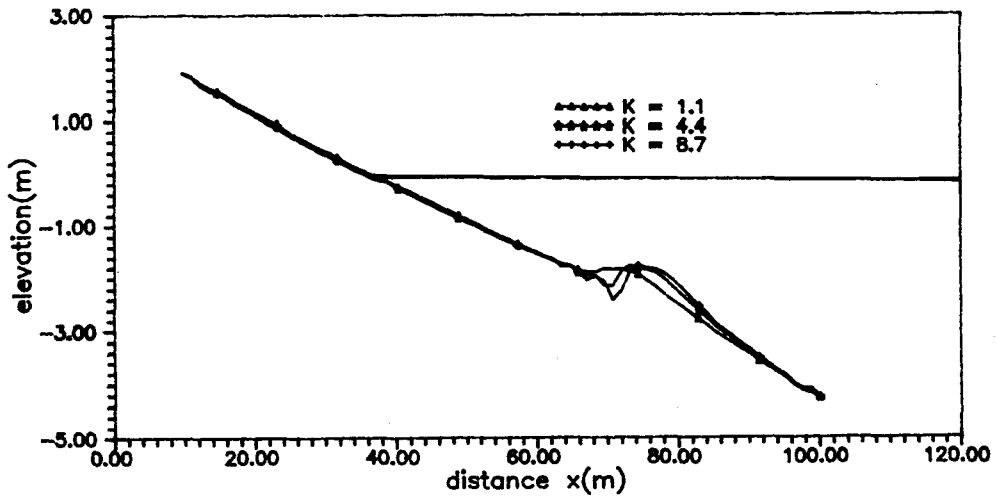


FIG. 5 Computed beach profile changes for different K -values.

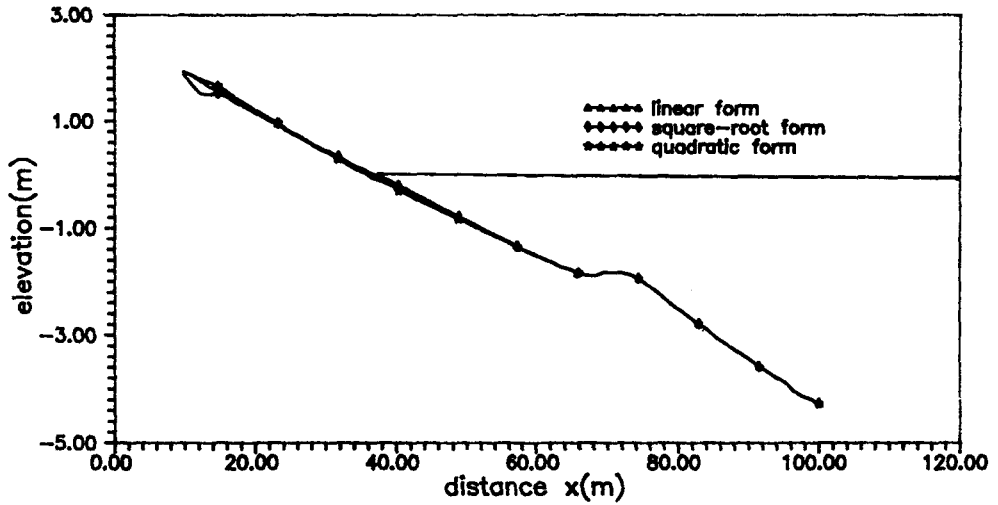


FIG. 6. Computed beach profile change for swash zone sediment.

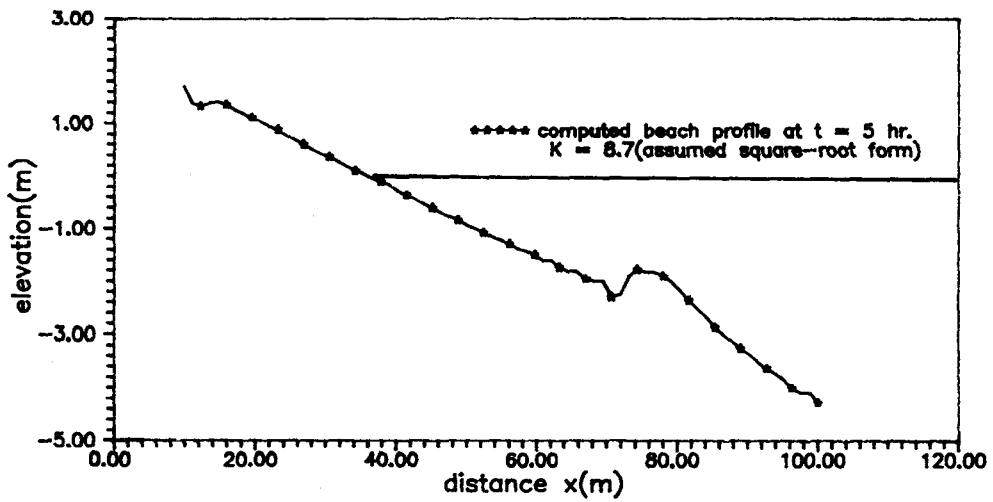


FIG. 7 Computed beach profile change($K=8.7 \times 10^{-6}$) at $t = 5$ hr.