

複合斷面地形에서의 波浪의 碎波變形特性 Wave Breaking Characteristics over Composite Slope Section

권혁민* · 요시미 고다* · 최한규**

Hyuck Min Kweon*, Yoshimi Goda* and Han Kyu Choi**

要 旨 : 쇄파감쇠과정을 포함한 파랑변형이 규칙파에 의해 관찰되었다. 파랑변형의 기초data를 얻기 위해 사면경사 1/20 및 1/10을 step에 연결한 지형을 설치하여 실험을 실시하였다. 쇄파후 파고는 감소하기 시작하여 쇄파점으로부터 임의의 거리에 일정한 값을 나타낸다. 본 연구는 안정파고에 관한 일반식을 가지고 쇄파변형모델을 제안한다. 모델은 실험치와 비교하여 급격한 수심변화에도 쇄파 전후의 파랑특성을 잘 설명함을 알 수 있었다.

Abstract □ The procedure of wave energy dissipation due to breaking has been investigated with trains of the regular wave. To obtain the data for wave breaking and its deformation, experiments have been conducted by utilizing a horizontal step adjoining to a combined slope of 1/20 and 1/10. After breaking, the wave height decreases by dissipation but attains a stable value at some distance from the breaking point. Experimental results show that the stable wave is considerably affected by the wave period. The study gives the general form of stable wave height. A new one-dimensional wave deformation model is proposed, being coupled with an approximated shoaling coefficient before wave breaking and the new energy dissipation term after breaking. It was compared with the experimental data. It predicts well the wave height deformation before and after wave breaking even on the abrupt change of the depth.

1. 서 론

일양사면에서의 쇄파현상은 많은 연구에 의해 매우 선명하게 되었다. 그러나, 현실의 해저의 지형은 연안사주가 존재하는 등 복합단면지형의 경우가 많고, 이러한 지형에서의 쇄파현상은 충분히 해명되어 있지 않다. 본 연구에서는, 복합단면에서의 쇄파감쇠과정을 검토하는 기초적 지형으로서, 사면에 접한 수평상을 이용하여 검토한다. 이 지형을 여기서는 수평 step이라고 한다. 수평 step상에서의 기존의 연구로서 Horikawa와 Kuo(1966), Mitzuguchi(1978) 등의 성과를 들 수 있다. Horikawa와 Kuo는 쇄파시점으로부터 내부 energy의 감쇠가 指數關數로 표현이 가능하다는 가정하에 감쇠속도의 계수를 실험적으로 구했다. 그러

나, Horikawa와 Kuo의 해석에서는 쇄파감쇠후에 파고가 일정치로 안정하다고 하는 과정까지는 검토하지 않았다. 이러한 쇄파감쇠 종료후의 파고를 여기서는 안정파라고 한다.

Mitzuguchi는, 쇄파후에 도달하는 안정파고와 수심과의 비율을 고려하여, 渦動粘性 모델을 발표했다. 그러나 그 모델에서는 안정파고수심비를 약 0.5로 대략산정함에 머물러, 안정파고에 도달하는 과정 및 그것에 대한 주기의 영향등은 음미하지 않았다.

본 연구는, 사면 및 수평 step상에서 파랑이 깨진 후 진행을 계속하여 안정한 파로 재생하는 과정을 해명하여, energy 감쇠항의 적절한 표현식을 얻음과 동시에 이를 통한 쇄파대내의 파랑특성을 규명하고자 한다.

*요코하마 국립대학교 건설학과 (Yokohama National University, Yokohama, Japan)

**강원대학교 공과대학 토목학과 (Department of Civil Engineering, Kangwon National University, Chuncheon, Korea)

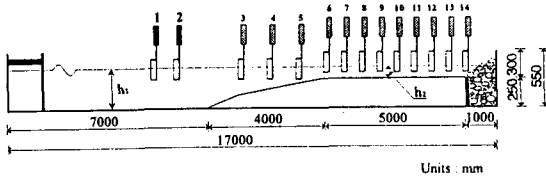


Fig. 1. Sketch of experimental setup.

2. 실험방법

쇄파감쇠의 기초 data를 얻기 위하여, 전장 17m, 폭 0.5m, 깊이 0.55m의 2차원조파수조에서 실험을 실시했다. 또한, 水平床上에서 쇄파하는 한계파고를 찾아내기 위하여, 수심 10, 12 cm에서 5종류의 주기에 대하여 입사파고를 미세하게 변화시키면서 실험을 했다. 길이 1m의 1/10 사면에 연속하여 길이 3m의 1/20 구배사면을 설치하였으며, 이후 5m의 수평상을 설치했다. 수평상의 높이는 水路床上 25 cm이며, 水平床上的 수심은 6 cm, 10 cm로 실험을 했다.

하나의 파랑에 대하여 14지점에서 측정했다. 이를 위해 순서적으로 파고계를 이동하여, 6지점의 동시측정을 3회에 걸쳐 실시했다. 이를 위해 순서적으로 파고계 #1은 조파판으로부터 3m 떨어진 곳에 설치하였으며, #2의 위치를 조정하여 Goda-Suzuki(1976)에 의해 제안된 입·반사파분리를 시도했다. 사면1/20가 시작하는 곳으로부터 #3, #4, #5 더욱이 step과 사면의 경계에 파고계 #6을 1m 간격으로 설치했다. 2종류의 수심에 대하여, 5가지의 주기에 대하여 파고를 4종류로 변화시켜가면서 실험을 했다. 파고는

일양수심부 2지점, 사면상 3지점 및 수평사상의 9지점에서 측정했다.

Data의 sampling 간격은 0.05초로 1회에 1024개의 data를 취득했다. 그리고 고속 Fourier변환(Fast Fourier Transform)을 이용한 band-pass-filtering에 의해 주파수 0.3 Hz부터 3.6 Hz까지의 범위의 파형을 추출하여 해석을 했다. 파고는 zero-down-crossing법으로 결정했다.

일양수심에서의 비쇄파 최대한계파고의 경우는 목측에 의해 깨지기 시작하는 파랑의 파고 level을 판정하여, 이의 전후에 0.2 cm 간격으로 5단계의 파고를 변화시키면서 실험을 했다. 해석된 파고의 값은 수평사상의 저면마찰때문에 거리에 비례하여 감소한다. 따라서 파고를 전대수지상에 거리에 대하여 plot하여 쇄파이전이라고 판단되는 data에 대하여

$$H = H_0 \exp(-\beta x)$$

관계로 curve fitting을 실시했다. 이때 H_0 를 비쇄파 최대한계파고로 추정했다. 이 실험은 step상의 수심 10 cm와 12 cm에 대하여 실시했다.

3. 안정파고의 추정

수평사상의 쇄파감쇠과정의 파고 data에 대하여 $H = H_0 \exp(-\epsilon_x/d) + H_s$ 의 관계를 가정하여, 축차최소자승법에 의해 안정파고 H_s 을 구했다. 이 해석은 Horikawa와 Kuo의 실험치에 대해서도 적용했다(Fig. 2). 또한, Iwagaki(1965)의 층류경계이론에 기초하여 저면마찰영향을 보정했다. 단, 마찰영향계수는 Iwa-

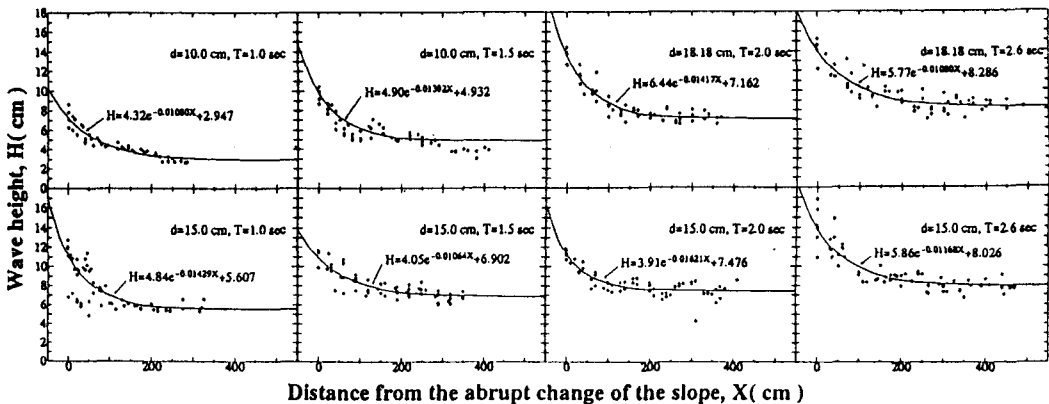


Fig. 2. Estimation of a stable wave height.

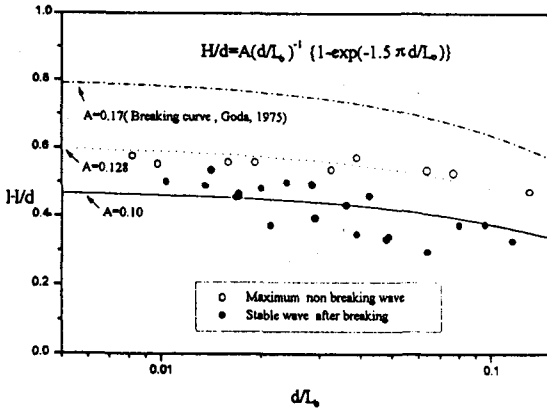


Fig. 3. Height to depth ratio of maximum nonbreaking waves and stable waves after breaking.

gaki 등에 따라 이론치의 40% 증가치를 사용했다. 이 그림으로부터 수심이 같더라도 주기가 긴 파일수록 안정파고가 크다는 것이 명확하다.

Fig. 3은 본 실험 및 Horikawa와 Kuo의 실험에서 얻어진 수평 step 지형에서의 안정파고와 쇄파한계 파고의 수심에 대한 비를 표시한 것으로서 Goda(1975)의 쇄파지표와 비교한 것이다. 이 그림으로부터 수평 step에서의 한계파고는 일양사면의 것보다 작음을 알 수 있다. 이것은 1/20구배사면으로부터 수평상상의 지형으로 변화하는 것의 영향으로 생각된다. 또한, 수평상상의 안정파고는 주기의 영향을 받아, 수심파장비(d/L_0)의 함수임을 알 수 있다. 안정파와 일양수심에서의 쇄파한계파고는 Goda(1975)의 쇄파지표를 이용하여 계수 A를 각각 0.10 및 0.128로 바꿈으로써 추정이 가능했다. 아래의 식 (1)은 안정파고에 관한 일반식이며, 식 (2)는 일양수심에서의 비쇄파 최대한계파고의 일반식이다.

$$H/d = 0.10(d/L_0)^{-1} \{1 - \exp(-1.5\pi d/L_0)\} \quad (1)$$

$$H/d = 0.128(d/L_0)^{-1} \{1 - \exp(-1.5\pi d/L_0)\} \quad (2)$$

4. 일차원 파랑변형모델

경험적으로 얻어진 안정파고 수심비 및 수평상에서의 쇄파한계파고 수심비를 계수로 하는 energy 감쇠항을 정식화하여 이를 energy 평형방정식에 대입하여 파고감쇠를 계산하였다. 또한 radiation stress를 포함한 mass balance 방정식을 풀어 평균수위를 계

算了. 파고 및 평균수위를 실험data와 비교했다.

4.1 기초방정식 및 차분화

일차원 파랑변형모델은 기초방정식으로써, energy 평형식을 사용하여 차분법으로 수치계산한 것이다.

$$\frac{\partial(EC_g)}{\partial x} = 0 : \text{쇄파전} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(EC_g)}{\partial x} = \frac{-K}{h} [EC_g - (EC_g)_s] : \text{쇄파후} \quad (4)$$

여기서, 첨자 s는 쇄파후의 안정파를 나타낸다. 식 (4)를 파고에 대한 것을 고쳐쓰면

$$\frac{\partial[H^2 C_g]}{\partial x} = \frac{-K}{d} C_g [H^2 - \Gamma^2 d^2] \quad (5)$$

여기서,

$$H_s = \Gamma d, \quad \Gamma = 0.10(d/L_0)^{-1} \{1 - \exp(-1.5 \pi d/L_0)\}$$

여기서, d는 수심, H_s 는 안정파고, K는 감쇠속도 계수, 그리고 Γ 는 안정파의 파고수심비이다.

식 (3), (5)를 전방차분을 써서 다시 쓰면 다음과 같으며 이를 이용하여 계산했다.

$$(EC_g)_{i+1} = (EC_g)_i \quad (6)$$

$$\frac{(H_{i+1})^2 (C_g)_{i+1} - (H_i)^2 (C_g)_i}{\Delta x} = -\frac{K}{(d)_i} (C_g)_i [(H_i)^2 - (\Gamma_i d_i)^2] \quad (7)$$

한편, 평균수위의 예측을 위해 다음식을 이용하여 계산한다.

$$\frac{d\bar{\eta}}{dx} = -\frac{1}{\rho g(h + \bar{\eta})} \frac{dS_{xx}}{dx} \quad (8)$$

여기서 $\bar{\eta}$ 는 평균수위, S_{xx} 는 radiation stress, h는 수심, ρ 는 밀도, g는 중력가속도이다.

$$S_{xx} = \frac{1}{16} \rho g H^2 \left[1 + \frac{4kh}{\sinh 2kh} \right] \quad (9)$$

식 (8)을 차분화하면,

$$\frac{\bar{\eta}_{i+1} - \bar{\eta}_i}{\Delta x} = -\frac{1}{(h_{i+1/2} + \bar{\eta}_{i+1/2})} \frac{(S_{xx})_{i+1} - (S_{xx})_i}{\Delta x}$$

Table 1. Comparison of error deviate from the Shuto's nonlinear shoaling coefficient

tanθ=1/10	Iwagaki et al.			New		
	α=22.8 β=1.2			α=-2.87 β=1.27		
H ₀ /L ₀	Maximum	Average	Minmum	Maximum	Average	Minimum
0.002	0.31998	0.03203	0.00001	0.19891	0.01514	0.00000
0.004	0.19134	0.02312	0.00001	0.11106	0.01079	0.00001
0.010	0.15431	0.02022	0.00004	0.09984	0.01054	0.00003
0.020	0.05871	0.01072	0.00010	0.02748	0.00431	0.00008
0.040	-0.03211	0.00103	0.00022	-0.04402	-0.00288	0.00018
0.080	-0.05877	-0.00285	0.00050	-0.06392	-0.00449	0.00044

*-부호는 Shuto의 모델보다 작음을 나타낸다.

$$\bar{\eta}_{i+1} - \bar{\eta}_i = - \frac{1}{1/2(h_i + h_{i+1} + \bar{\eta}_i + \bar{\eta}_{i+1})} [S_{(xx)i+1} - S_{(xx)i}] \quad (10)$$

4.2 비선형 천수계수의 근사식

파랑의 천수변형은 수심이 얇아짐에 따라서 비선형성이 강해지는 경향이 있다. Shuto(1974)는 Cnoidal파의 천수변형을 검토하여 비교적 간단한 식으로 천수효과를 표현하고 있다. 본 연구는 비선형성을 고려한 Shuto의 모델에 대해 천수근사식을 구하기로 한다. 한편, Iwagaki 등(1981)은 Stokes파와 Chappellear(1962)의 Cnoidal파 이론에 기초한 hyperbolic파에 대하여 천수변형근사식을 제안했다. 본 연구는 Iwagaki 등의 근사식의 계수인 수심파장비와 파고파장비의 승지수를 변화시켜 근사정도를 검토하여, Shuto에 의한 이론치와 오차가 최소로 되는 승지수를 구했다.

적용한 근사식은 Iwagaki 등에 의해 제안된 다음의 식이다.

$$K_s = K_{s0} + 0.0015(h/L_0)^{\alpha}(H_0/L_0)^{\beta} \quad (11)$$

여기서, K_{s0}는 선형이론에 의한 천수계수이다.

수심파장비는 0.005 ≤ h/L₀ ≤ 0.500 범위이며, 파고파장비는 0.002 ≤ H₀/L₀ ≤ 0.080의 범위로 Shuto의 천수계수와의 사이에 오차를 검토했다. 그의 비교의 조건과 결과는 다음과 같다.

Iwagaki 등이 제안한 천수근사식은 0.040 ≤ H₀/L₀ ≤ 0.080의 범위에서 약간 좋은 결과를 보여주고 있다. 그러나, 다른 범위에서는 New의 오차가 작음을 알 수 있다. 그리고, Shuto의 모델과 비교한 Fig.4를 보면

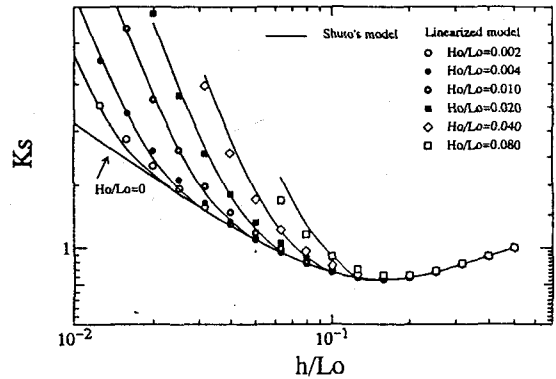


Fig. 4. Comparison of empirical coefficient with Shuto's model.

H₀/L₀=0.08의 경우를 제외하고는 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 본연구에서는 식 (11)에서 α=-2.87, β=1.27을 도입한 새로운 식을 천수계수의 산정식으로 사용하기로 한다.

4.3 새로운 일차원 파랑변형모델의 접근방법 및 순서

파랑의 천수변형·쇄파모델은 쇄파전과 쇄파후로 크게 나눌 수 있다. 쇄파대에 도달한 파랑은 비선형성이 강하므로 유한진폭파를 이용하여 계산하는 것이 일반적일 것이다. 그러나, 모델에 요구되는 문제중에서 정도와 효율성은 중요한 요소이다. 본 모델에서는 비선형파를 사용할 경우 발생할 효율성의 저하 또는 선형이론을 사용할 경우 정도의 저하를 서로 보완한 새로운 생각을 제안한다.

Fig.5는 쇄파전후의 연속적인 파랑의 변형과정을 생각한 그림이다. 먼저 실험에서 얻어진 입사파는

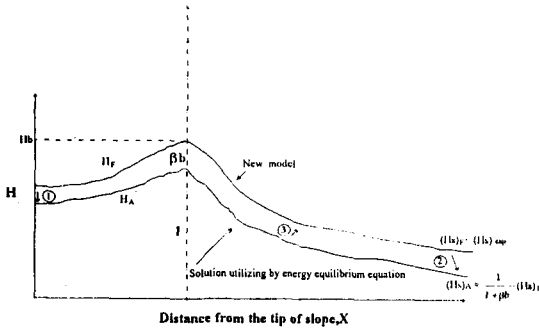


Fig. 5. Conceptual sketch of treatment of wave heights in new model.

이미 비선형파랑으로 되어 있으므로 실험에서 얻어진 파고 H_F 가 식 (11)의 천수변형을 받고 있다고 보고, 반복수렴계산에 의해 미소진폭파로서 상당심해파고 H_0' 를 추정한다(①). Energy 평균방정식에 의한 계산은 미소진폭파로서의 파고(H_A)를 이용하여 실시했다. 그 결과는 비선형성을 고려한 식 (11)을 이용하여 비선형파고로 환산한다(H_F). 쇄파지점은 새롭게 계산한 비선형파고를 쇄파지표와 비교하여 판단한다. 쇄파지점이 결정되면 그 지점에서의 비선형파고와 선형파고의 비율($1 + \beta_b$)을 계산하여 두고, 쇄파후의 전과정에 같은 비율로 계산하여 간다(③). 특히, 쇄파하면서부터 쇄파감쇠과정에는 먼저 실험에서 얻은 안정파고(H_S)_F를 선형파고(H_S)_A로 변경시켜서 계산해 간다(②). 즉, 쇄파지점의 유한진폭파와 미소진폭파의 비율($1 + \beta_b$)을 계산하여 쇄파의 전과정에도 동일한 비율로 계산한 것이다. 더욱이 이 계산과정은 효율적으로도 비선형파를 사용한 것보다 빠른 방법이다. 이의 구체적인 계산의 순서는 Fig. 6에 표시했다. 한편, 계산에 의해 얻어진 파고를 가지고 radiation stress를 계산하여 두고, 이를 통해 평균수위변동을 계산했다. 쇄파의 유무는 사면상에서는 Goda의 지표, 수평 step상에서는 식 (2)를 비교하여 판단했다. 그러나, 일양수심부에 도달하기 전에 깨어지지 않은 경우는 파랑은 수평 step상의 최대한계파고보다 큰 경우에 도달한 파고를 쇄파파고로서 추정했다. 이것은 Fig. 3에 보인 것과 같이 일양수심에서의 최대 한계파고는 사면의 것보다 작기 때문에 그 사이의 파랑은 불연속적인 상태, 즉 파고가 1지점에서 급속히 작아지는 물리적으로 있을 수 없는 상태가 생기지 않도록 하기 위함이다.

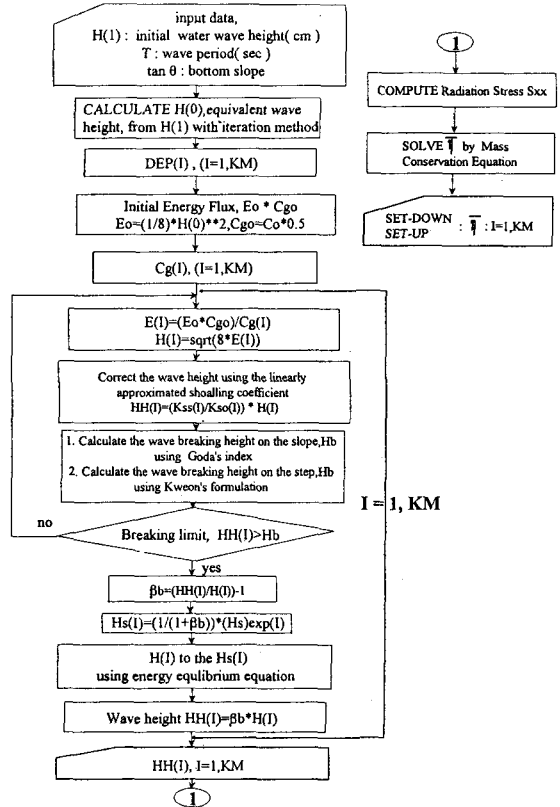


Fig. 6. Flow chart of one-dimensional wave deformation model.

5. 실험결과와 일차원 Model의 비교

Fig. 7은 실험치와 일차원 model의 비교를 보여주는 그림이다. step이 시작되는 400 cm부터는 전 data가 마찰영향을 보정했다. 식 (5)의 속도감쇠계수 K는 0.15로 했다. 전체적으로 실험과 계산결과가 잘 맞고 있다. 특히 쇄파지점의 예측이 잘된 경우는 쇄파하여 감쇠하는 과정이 정도 높게 재현되었다(run group 1, Case 4, 7). 그러나 비교적 장파가 step의 위에서 깨어지기 시작하는 경우는 본 model로 설명이 불가능하다.(run group 2, Case 13, 17). 또한 쇄파후의 감쇠속도는 긴 주기를 가진 파랑이 비교적 늦음을 알 수 있다(run group 1, Case 20).

6. 결 론

수평 step에서의 한계파고는 일양사면의 것보다

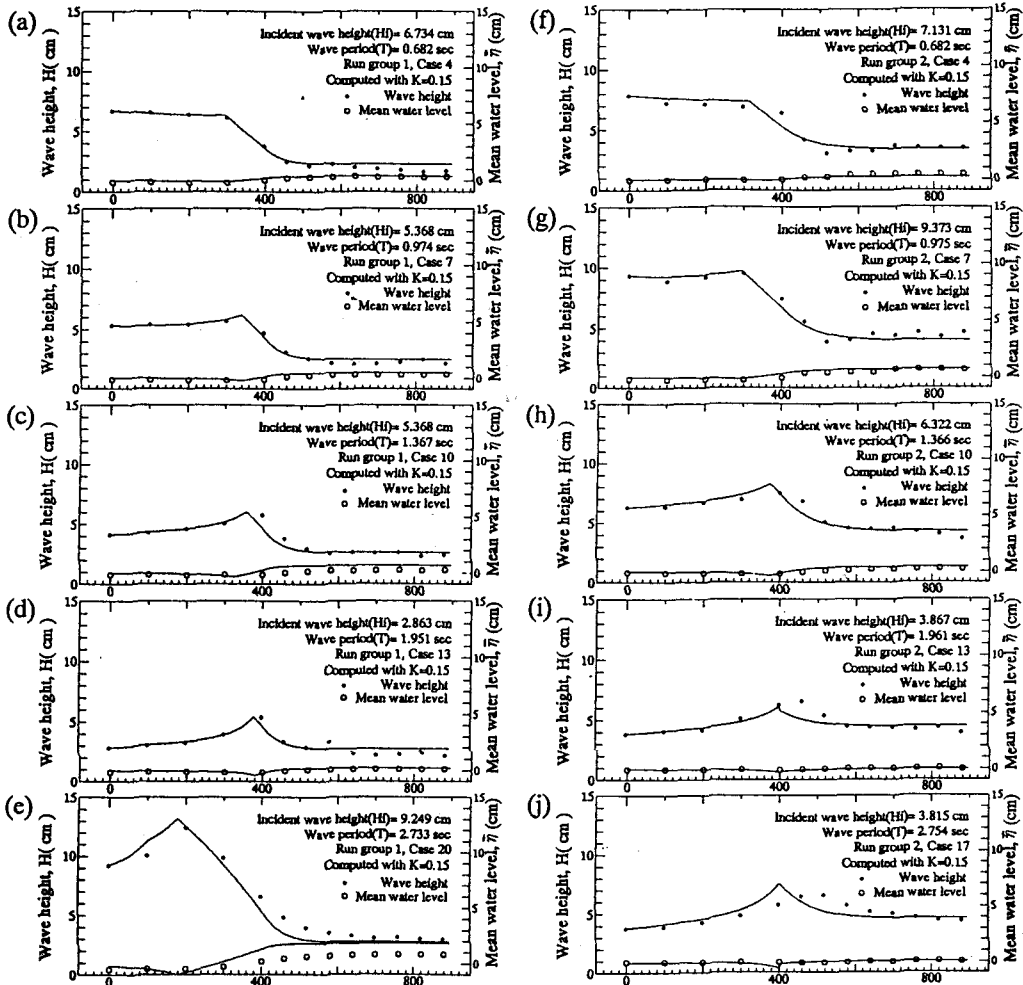


Fig. 7. Comparison of 1-d wave deformation model with experimental data.

작음을 알았다. 이것은 1/20구배사면으로부터 수평상상의 지형으로 변화하는 영향이라고 생각된다. 또한, 수평상상의 안정파고는 주기의 영향을 받아 수심과 장비(d/L_0)의 함수임을 알았다. 안정파고와 일양수심에서의 쇄파한계파고는 Goda(1975)의 쇄파지표를 이용하여 계수 A를 각각 0.10 및 0.128로 바꿈으로써 추정이 가능했다. 더욱이, 수평상에서의 쇄파감쇠과정의 파고변화는 새롭게 정식화한 energy 감쇠항을 이용하여 적절히 추정이 가능했다. 또한 평균 수위 변동도 추정이 가능했다.

참고문헌

水口 優, 堀川清可(1978): 碎波後の波高變化についての一考

察, 第25回 海岸工學講演會論文集, pp. 155-159.
 合田良實 淺水域における波浪の碎波變形, 港灣技術研究報告, 第14卷第3號, pp. 59-106.
 岩垣雄一, 土屋義人, 陳 活雄(1965): 海底摩擦による波高減衰の基礎的研究(3), 第12回 海岸工學講演會論文集, pp. 41-49.
 首藤伸夫(1974): 非線形長波の變形, 第21會海岸工學講演會論文集, pp. 57-63.
 郭 金棟(1965): 碎波後の波の變形に關する研究, 東京大學校修士論文.
 岩垣雄一, 鹽田啓介, 土屋宏行(1981): 有限幅陳波の淺水變形と屈折係子, 第28回海岸工學講演會論文集, pp. 99-103.
 Dally, W.R., Dean, R.G. and Dalrymple, R.A., 1985. Wave height variation across beaches of arbitrary profile, *J. of Geophysical Research*, pp. 11,917-11,927.
 Horikawa, K. and Kuo, C.T., 1966. A study on wave transformation inside surf zone, *Proc. 10th Coastal Eng. Conf.*, ASCE, pp. 217-233.