

海岸堤防の越波に関する基礎的研究 (1)

吉川 秀夫*・椎貝 博美**・河野 二夫***

1. 緒 言

海岸堤防および護岸などを合理的に設計する場合来襲する波の打ち上げ高や、越波量などがどの程度であり、どのような機構で発生しているかを十分検討して総合的な立場において設計する必要がある。このようなことから、たとえば波の遡上やあるいは越波について従来から多くの実験的研究がなされ^{1), 2), 3), 4)}、特に波の遡上については理論的研究もなされている^{5), 6)}。越波量に関する Osvald J. Sibul and Ernest G. Tickner⁷⁾ の実験は風洞を用いて風のともなった場合の越波量を測定し風の無い場合の W.E.S. の実験結果と比較している。上記文献の中での理論的研究では、いずれも摩擦項を無視しているが、岩垣ら⁸⁾ によると孤立波の遡上について考察した結果、遡上の機構は摩擦を無視しては説明できないと述べている。また砕波した越波の研究では砕波後のエネルギー損失を考慮した台湾省立成功大学の研究がある⁹⁾。このように数多くの研究がなされているが十分解明されているとはいえない。このことは遡上の機構が複雑であり、遡上から越波の問題を取扱う場合にさらに複雑になるためであろう。前に筆者らは直立壁の越波について実験を行ない¹⁰⁾ 重複波による越波量は直立壁をせきと考えた場合の越流の計算が適用できることを示した。ここでは一様な勾配をもった堤防の越波について実験を行ない、直立壁の場合と同様せきの越流の計算が適用できることを示した。

2. 記号の説明

本文中で用いる主な記号の説明を表-2.1 に示す。

表-2.1 記号の説明 (C.G.S. 単位)

H_0 : 測定地点の波高	T_0 : 測定地点の周期
L_0 : 測定地点の波長	h_0 : 水槽水平部の水深
H : 斜面上の波高	L : 斜面上の波長
h : 斜面における静水時の水深	α : 斜面の鉛直角 (度)
R : うち上げ高	S : 斜面勾配
Z : 静水面に垂直な上向きの軸	$k = Z_{\max}/H_0$
F : 波形を示す時間に関する関数記号 $F(t)$	x : 水平軸
	q : 堰幅 B 当り単位時刻の越波量
	m : 定常流の場合の堤防の

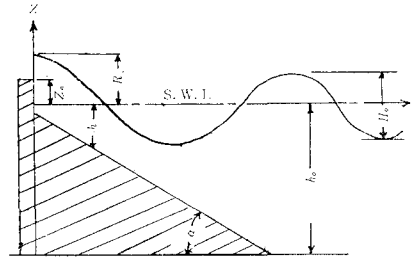
Q : 堰幅 B 当り 1 周期当りの越波量
 Z_0 : 静水面よりの堰高

越流係数
 M : 堤防の越波による越流係数 $M = m \cdot k^{3/2}$

3. 理論的考察

図-3.1 で堤防をせきと考えた場合これを越える流れについて堰幅 B につき越波量 q は式 (3.1) で示される。

図-3.1 説明図



$$q = \frac{2}{3} m B \sqrt{2g} (Z - Z_0)^{3/2} \dots\dots\dots (3.1)$$

ここで $Z = Z_{\max} \cdot F(t)$ とおくと式 (3.1) は式 (3.2) になる。

$$q = \frac{2}{3} m B \sqrt{2g} (Z_{\max})^{3/2} \left\{ F(t) - \frac{Z_0}{Z_{\max}} \right\}^{3/2} \dots\dots\dots (3.2)$$

ただし式 (3.2) は $F(t) > Z_0/Z_{\max}$ の範囲で考えるものとする。つぎに $Z_{\max} = k H_0$ とおくと式 (3.3) がえられる。

$$q = \frac{2}{3} m B \sqrt{2g} k^{3/2} H_0^{3/2} \left(F - \frac{Z_0}{k H_0} \right)^{3/2} \dots (3.3)$$

式 (3.3) で k は一応定数とする。

水位が上昇する場合も下降する場合も越流に関しては同様の現象が生ずると考えれば一周期当りの越波量 Q は、

$$Q = 2 \int_{t_1}^{t_0} q dt = \left[\frac{4}{3} m B \sqrt{2g} k^{3/2} \int_{t_1}^{t_0} \left(F - \frac{Z_0}{k H_0} \right)^{3/2} dt \right] H_0^{3/2} \dots\dots\dots (3.4)$$

になる。式 (3.4) で t_1 は Z が Z_0 に等しくなる時刻を示し、同様に t_0 は Z が $Z_{\max}$ に等しくなる時刻をおのおの示す。式 (3.4) を書き直すと式 (3.5) または式 (3.6) になる。

$$\frac{Q}{T \cdot B \cdot H_0 \cdot \sqrt{2g} H_0} = \frac{4}{3} m k^{3/2} \cdot \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_0} \left(F - \frac{Z_0}{k H_0} \right)^{3/2} dt \dots\dots\dots (3.5)$$

* 正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科
** 正会員 工博 東京工業大学助教授 工学部土木工学科
*** 正会員 東京工業大学助手 工学部土木工学科

$$\frac{Q}{T \cdot B \cdot H_0 \cdot \sqrt{2gH_0}} = \frac{4}{3} M \cdot \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_0} (F - K_0)^{3/2} dt \quad (3.6)$$

ここに $M = mk^{3/2}$, $K_0 = Z_0/kH_0$ である。

さて、式 (3.4) の意味を物理的に考えてみると、まず $Z_{\max}$ は波形の振幅であることは明らかであるが、堤防をせきと考えるとときの越流を考える場合この波形をどの地点で考えるのがもっとも適当であるかということである。まず堤防直前での最大振幅を $Z_{\max}$ とすることが考えられる。越波が生じているときの打ち上げ高というものに関する研究はあまりないが、この値が通常の意味の打ち上げ高とあまり相違がないものとすれば、 $Z_{\max}$ は一種の打ち上げ高とみることができる。このように考えるとときの $Z_{\max}$ 、つまり打ち上げ高は波形勾配や堤防斜面の傾斜角などの影響を受けるであろう¹¹⁾。また風の影響も受けるであろう。つぎに考えられることはもう少し抽象化して考えると、いま通常のせきの流れの場合 $Z_{\max}$ はせきの上流側のエネルギー高に相当する。したがって越波の場合も、 $Z_{\max}$ はエネルギー高のようなものと考えerことも不合理ではない。それゆえ、 $Z_{\max} = kH_0$ とおいたことはエネルギー高が波高 H_0 に比例すると考えたことになる。このように考えるとエネルギーを増大させるような要素たとえば風は k の増加としてえられることになる。

4. 実験装置と実験方法

実験装置は図-4.1 から図-4.3 に示した3種類のもので水路延長約 11 m、水路幅 0.6 m の水平な水路の末端に堤防天端幅 1 cm、高さ 50 cm の直立壁の形式 (a) とこれに斜面勾配 30° の構造物を取り付けたもの (b)、さらにこれに高さ 5 cm の直立壁を取り付けたもの (c) の3種類である。また水路末端には採水槽があって越波量の時間的な変化を測定できるようになっている。

波高と越波量の測定はいずれも抵抗線式波高計とビジ

図-4.1 堤防形式 (a)

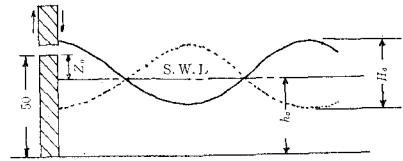


図-4.2 堤防形式 (b) $\alpha=30^\circ$

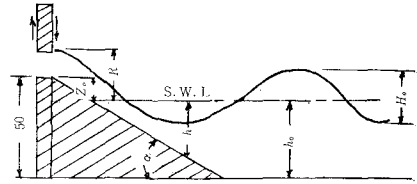
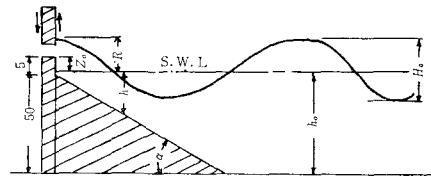


図-4.3 堤防形式 (c) $\alpha=30^\circ$



グラフを使用した。

また堤防天端の上部には、上下に開閉自由な扉があって越波量を測定する場合に開けるようになっている。

実験方法は最初造波板で波を発生させ、ある程度一定の波形になったと考えられる時に越波させるものである。なお波高の堤防天端より約 30 cm、80 cm、1 波長の地点で測定してある。

実験結果は主に O.J. Sibul 等の Beach Erosion Board で行なった実験結果および Waterways Experiment Station で行なった実験結果と比較してあるので B.E.B. および W.E.S. で行なった実験装置の略図を図-4.4 に示した。

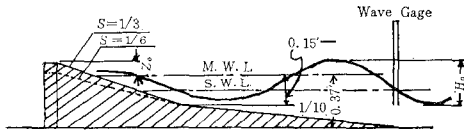
3 種類の実験装置 および B.E.B. と W.E.S. で行な

表-4.1 実験波の特性

実験波	H_0 (cm)	T_0 (sec)	L_0 (cm)	h_0 (cm)	Z_0 (cm)	α または S	平均風速 (feet/sec)	実験総数	備 考
(a)	4.9~15	1.79~2.36	340~480	47~49.5	0.5~3	$\alpha=90^\circ$		19	L_0 = 計算値 ~: 範囲を示す
(b)	3.5~15.5	2.08	390~450	45~50	0~5	$\alpha=30^\circ$		21	"
(c)	8.5~16.5	2.08	426~440	48~52.5	2.5~7	$\alpha=30^\circ$ $\alpha=90^\circ$		15	"
(d)	1.98~5.16	0.36~0.65		11.3	3.98	$S=1/10$ $S=1/3$	12.4~31.7	15	B.E.B. の実験 有義波 (風あり)
(e)	3.56~4.91	0.58~0.67	48~57	11.3	3.98	$S=1/10$ $S=1/6$	26~32	15	B.E.B. の実験 有義波 (風あり)
(f)	122~366	4.5~7	3180~7600	760	26.5~111	$S=1/3$		15	W.E.S. の実験 (風なし)
(g)	122~366	4.5~7	3180~7600	760	26.5~111	$S=1/6$		15	W.E.S. の実験 (風なし)

(注) W.E.S. および B.E.B. の実験結果は彼らの多くの資料の中から本文に用いたものだけの範囲と総数を示す。

図-4.4 堤防形式 (d) $S=1/3$ (BEB)
 " (e) $S=1/6$ (BEB)
 " (f) $S=1/3$ (WES)
 " (g) $S=1/6$ (WES)

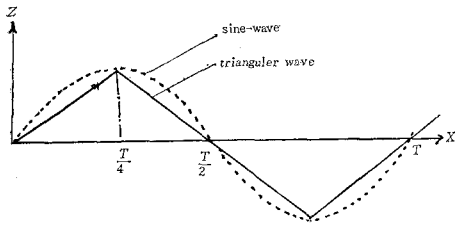


われた波（以下この波を実験波と呼ぶことにし図面の説明では各実験装置の堤防形式 (a), (b)… で代用する）の特性を表-4.1に示した。

5. 実験結果と理論値の比較

越波量算定の基本式 (3.5) および (3.6) で波形は実際の波形を用いることが望ましいが、計算の便宜上本文では図-5.1に示すような規則波 (sine および三角波形の2種) として取扱う。

図-5.1 規則波の説明



波形を sine wave と仮定した場合と三角波と仮定した場合では前者は波形の性質上越波量が大きく算出されることになる。すなわち実際の越波量に対する比率（越流係数）は三角波の場合に対し小さくなる。

いま波形を sine wave とすると F は式 (5.1) で示される。

$$F = \sin \frac{2\pi}{T} t \dots \dots \dots (5.1)$$

式 (5.1) を式 (3.5) および (3.6) に代入すると式 (5.2), (5.3) のようになる。

$$\frac{Q}{T \cdot B \cdot H_0 \sqrt{2gH_0}} = \frac{4}{3} m k^{3/2} \cdot \frac{1}{T} \int_0^{T/4} \frac{1}{T/2\pi \cdot \arcsin(Z_0/kH_0)} \cdot \left\{ \sin \frac{2\pi}{T} t - \frac{Z_0}{kH_0} \right\}^{3/2} dt \dots \dots \dots (5.2)$$

$$\frac{Q}{T \cdot B \cdot H_0 \sqrt{2gH_0}} = \frac{4}{3} M \cdot \frac{1}{T} \int_0^{T/4} \frac{1}{T/2\pi \cdot \arcsin(K_0)} \cdot \left\{ \sin \frac{2\pi}{T} t - K_0 \right\}^{3/2} dt \dots \dots \dots (5.3)$$

前と同様にして、波形を三角波と仮定すると式 (3.5) および式 (3.6) はおのの式 (5.4), (5.5) のようになる。

$$\frac{Q}{T \cdot B \cdot H_0 \sqrt{2gH_0}} = \frac{2}{15} m k^{3/2} \left(1 - \frac{Z_0}{kH_0} \right)^{5/2} \dots \dots \dots (5.4)$$

$$\frac{Q}{T \cdot B \cdot H_0 \sqrt{2gH_0}} = \frac{2}{15} M (1 - K_0)^{5/2} \dots \dots \dots (5.5)$$

(1) m および k の値について

T, B, H_0, Z_0 の値が与えられて式 (5.2)~(5.5) のいずれかで越波量を計算する場合、 m および k の値が必要になってくる。

m の値は定常流についてのせきの越流係数であり、直立壁の場合につき測定した結果はほぼ0.5であったので、本文では $m=0.5$ とする。 k については波形勾配や堤防斜面の傾斜角など¹¹⁾また風などにより決まる値であるとする。本文では $m=0.5$ として実験値との比較によって k の値を求め、その特性を調べた。図-5.2は越波量の実測値から式 (5.4) を用いて k の値を求め波形勾配との関係を示したものである。図で L_0, H_0 は本来は沖波をとるべきであるが実験の便宜上堤防天端から約1波長の地点の越波のないときの実測値で代用した。また

図-5.2 k と H_0/L_0 の相関

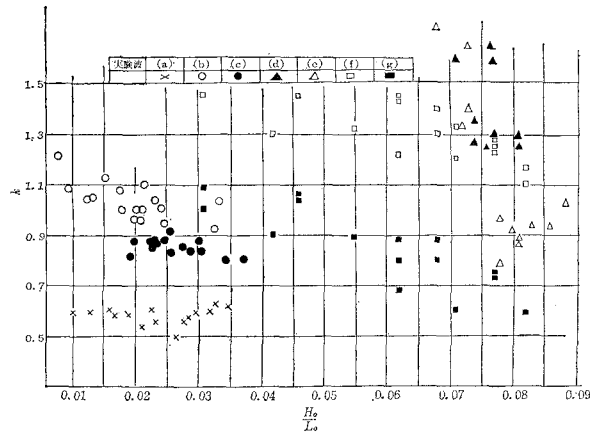
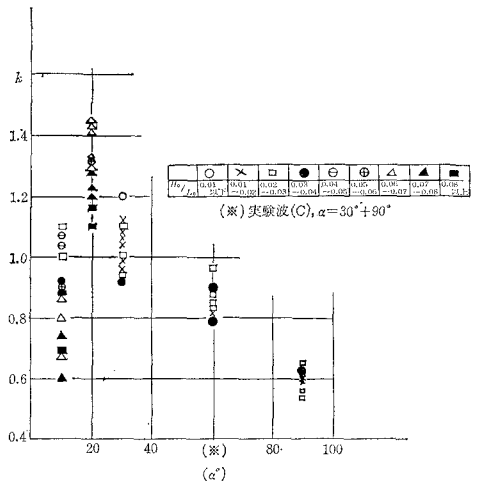


図-5.3 k と α および波形勾配との関係



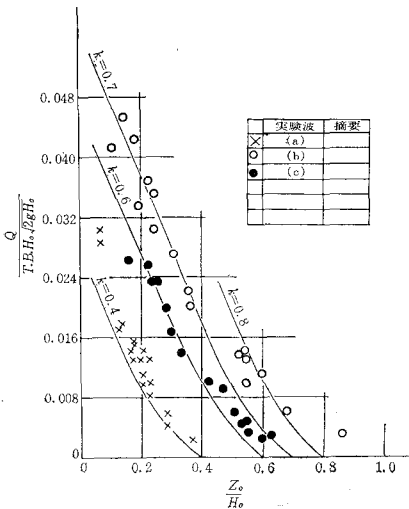
越波前後の波形の変動については越波量の少ないときはビジグラフの感度がなく特に越波量の多い場合について述べると波高が約 1~2% 程度減少している。さて、図でわかるように k の値は波形勾配および風の影響を相当に受けている。とくに $S=1/3$ の風をともなった B.E.B. の実験波 (d) および $S=1/3$ の風をともなわない W.E.S. の実験波 (f) は最も影響を受けている。また直立壁のある場合 (a, c) は直立壁のない場合と比較してあまり影響を受けず、かつ k の値も小さい。ただ $S=1/6$ の W.E.S. の実験 (g) は碎波点と堤防までの間が長いのでエネルギー損失が大きく、したがって run-up も小さいと述べているが⁷⁾、図で k の値が小さいのはこのようなことに相当するのではないかと考えられる。図-5.3 は堤防のり面の斜面角 α と k との関係を調べたものであるが、 α によって k の値が変わることがわかる。W.E.S.⁷⁾ によれば run-up を最大にする限界は α が 28~30° であるとしているが越波量の実測値から逆算して求めた k の値も本実験の範囲内では図からほぼ同様の傾向が見られる。

(2) 越波量について

5.(1) で述べたように k の値は H/L または α により種々の値になる。したがって $m=0.5$ または $M=0.5$ として、 k をパラメーターとして理論式と実験値の比較を行なった。

この結果を図-5.4~5.7 に示す。 m を一定とするのが合理的か、あるいは M を一定とするのがより合理的であるかは簡単に判断できないが、図-5.5 と図-5.7 からわかるように M を一定にするとすべての現象が一本の理論曲線にのることがわかる。また図で理論式と実験値は比較的一致している。特に三角波と仮定した場合はよく一致する。

図-5.4 Sine wave と仮定した時の理論曲線と実験値
(5.2) 式, $m=0.5$



6. 結 論

以上のことを要約するとつぎのとおりである。

(a) 越波現象をせきと考えた時の越流の計算が適用できる。特に波形を三角波と考えたときが実験値とよく一致する。

図-5.5 Sine wave と仮定した時の理論曲線と実験値
(5.3) 式

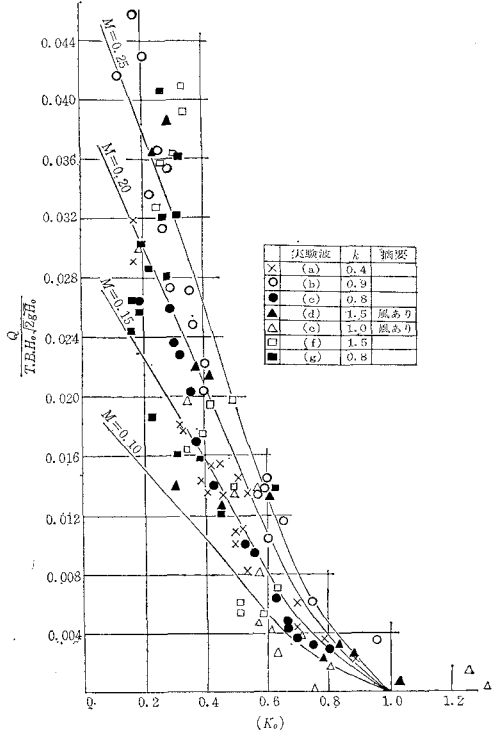
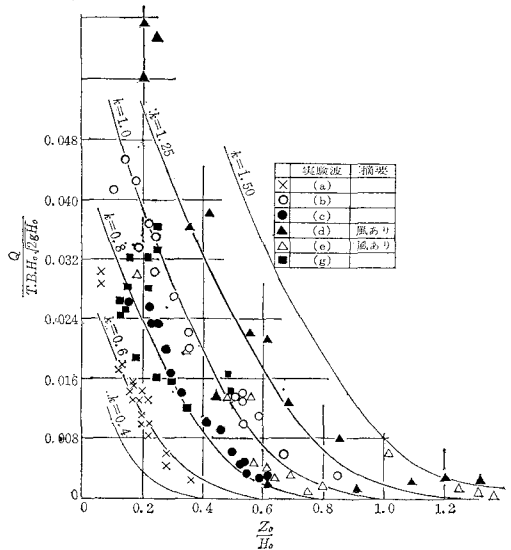
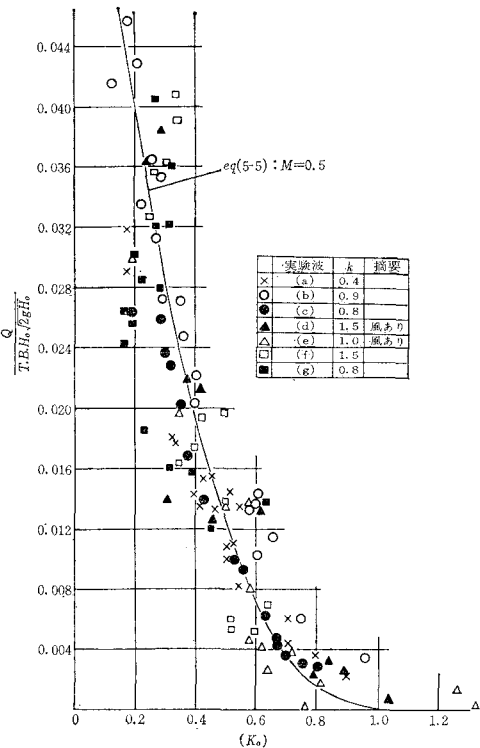


図-5.6 三角波と仮定した時の理論曲線と実験値
(5.4) 式, $m=0.5$



図一5.7 三角波と仮定した時の理論曲線と実験値



(b) 種々の条件に対する越波量が越波の時の越流係数 M を一定とし $K_0 = Z_0/kH_0$ で整理すると実験結果はほぼ統一的に整理できる。ただし k の値は波形、風速、勾配などの影響を受ける。

(c) 現在のデータによって k の値を定めることは軽

軽しくはできないが、大体の傾向を定めることはできる。
本実験にあたり土木工学科四年片岡真二君の助力を得た。
また、文部省特定研究、水理構造物の機能の援助を受けた。厚い謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Saville, T. Jr. : Wave run-up on shore structures, Proc. A.S.C.E., Vol. 82, 1956.
- 2) 石原藤次郎・岩垣雄一・鈴木雄太 : 海岸堤防の設計 特にその有効高について, 第 2 回海岸工学講演会講演集, S 30 年.
- 3) 豊島 修・首藤伸夫・橋本 宏 : 海岸堤防への波のうち上げ高—海底勾配 1/30—, 第 11 回海岸工学講演会講演集, S 39 年.
- 4) 石原藤次郎・岩垣雄一・三井 宏 : 海岸堤防の越波防止効果について, 第 4 回海岸工学講演会講演集, S 32 年.
- 5) G.F. Carrier and H.P. Greenspan : Water waves of finite amplitude on a sloping beach, Jour. of Fluid Mechanics, Vol. 4, 1958.
- 6) 首藤伸夫 : 長波のうち上げ高, 第 13 回海岸工学講演会講演集, S. 41 年.
- 7) Osvald J. Sibul and Ernest G. Tickner : Model study of overtopping of wind-generated waves on levees with slopes of 1 : 3 and 1 : 6, Beach Erosion Board, Tech. Memo. No. 80, 1956.
- 8) 岩垣雄一・井上雅夫・大堀晃一 : のり面の波の遡上機構に関する実験的研究, 第 13 回海岸工学講演会講演集, 1966.
- 9) 倪 超 : Report on the model test of sea-dike cross-rection of Hsin-Chu Tidal Land, 台湾水工試験室研究試験報告第 6 号中華民國 52 年.
- 10) 吉川秀夫・椎貝博美・河野二夫 : 直立壁の越波に関する一実験, 第 22 回土木学会年次講演会講演集, S 42 年.
- 11) 岩垣雄一 : 海岸堤防論, 水工シリーズ 64—08, 1964 年 7 月, p. 17~p. 26.