海　堤　之　堤　坡　與　波　浪

鄭　育　時　節　譯

本文摘譯自 Journal of the Waterways and Harbours Division，ASCE Vol 850 主要說明波浪能量消失之途徑及反射，湧升等現象與堤坡之關係，歸納學理與試驗之結果，並作與工程設計有關之結論，

一、前　　　言

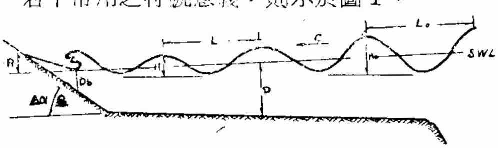
因海岸地區經濟之日益發展，海堤之重要性亦隨而俱增，但於工程設計安全方面，恆受制於工程經濟，不能有過份安全之佈署。海水之巨大破壞力量，亦素爲人所深知。1953年２月，英、荷沿海之暴風浪，其所引起之巨災更爲人所矚目，固然，若干海堤之失敗，起因於結構自力或地基之缺陷，但因暴浪漫越堤頂或堤脚被侵蝕而破堤者佔大多數。故從事海堤設計者，應以認識各式波浪與各式堤坡之關係爲首着。

二、波浪性質簡述

1. 波浪性質

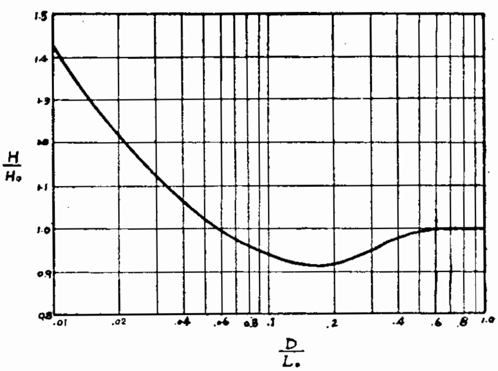
本文所論均以暴風浪時之海面爲基準，卽海面爲正常水位，潮位及風浪時壅高現象等之綜合結果。並設波浪在抵達海堤之先，波高不受曲折（Refraction）之影響。

若干常用之符號意義，則示於圖１。



（圖 1）符號及意義

通常，深水波常被指爲水深大於½波長之波浪，卽 $\frac{D}{L} > \frac{1}{2}$ 圖２示淺水波與深水波之波高關係。以 $\frac{D}{L_0}$ 之函數表之。自之可知，當 $\frac{D}{L_0} >$ 0.033 時 $\frac{H}{H_0}$ 值之變動很小，均在 1.0±0.1 範圍內。波長及波速之計算，示如式（１）及（３）；



（圖 2）淺水波波高H與深水波波高H_0之關係

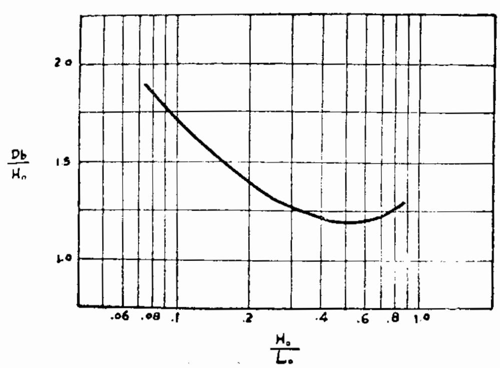
$$\frac{L}{L_0} = \tanh\frac{2\pi D}{L} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

$$C^2 = \frac{gL}{2\pi}\tanh\frac{2\pi D}{L} \cdots\cdots\cdots\cdots (3)$$

自 Munk 氏之孤立波（Solitary Wave）理論，可得碎波波高與水深之關係如式（２）：

$$\frac{H_b}{D_b} = 0.78 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

Suquet 氏計算 $\frac{D_b}{H_b}$ 與 $\frac{H_0}{L_0}$ 之關係示於圖３。



（圖 3）碎波深度與深水波波高之比 $\frac{D_b}{H_o}$ 對 $\frac{H_o}{L_o}$ 之關係（Suquet氏）

自上述各基本關係，波浪性質之大部份均可求得。當波浪向岸運動時，週期 T常可視作固定值。

2. 波浪能量

波浪能量傳播之速度與波速不同；深水中，僅為波速之半值；於極淺水中（即 $\frac{D}{L}>0.04$）約與波速相同，淺水波之總能量略比深水波者小，但較集中於近水面之處。故海堤前之波浪其能量之傳播與集中情形，與波浪性質及水深有密切關係，本文將詳為說明之。

波浪與海堤或灘岸碰撞後，能量之消失約有以下各式：

A. 反射

B. 轉變為位能，沿堤坡洶湧而上；

C. 轉變為熱能

a. 因碎波之紊流而生

b. 因堤坡表面之粗糙而生

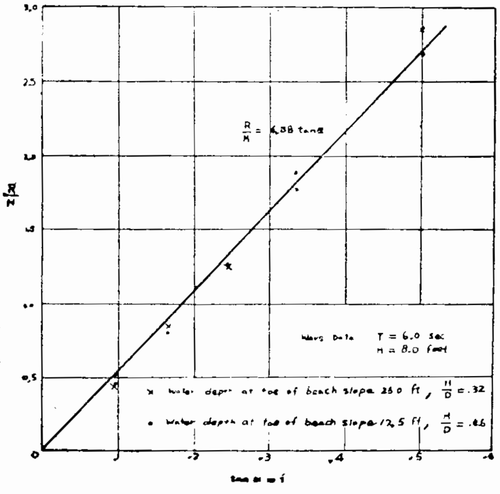
c. 於透水性結構，空隙內水流之攪動而生

於空隙率甚大之結構，如堆石堤等，能量亦有可能自堤前傳播於堤後。

三、波浪在堤坡上之反射

波浪進抵結構或灘岸時，可能有全部或部份之反射（Reflection）。此種反射波，有時且為引致海面局部激盪之因素。堤前灘地，因反射波而侵蝕，致結果崩壞者為例甚多，故在海堤設計上，應盡量減小反射波之發生。

Miche Irribarren 及 Nogales 諸氏均對波浪之反射問題有所論述。Miche 氏求得，在理論上，深水波為一斜面所全部反射時，波浪之最大峻度（Steepness）即（$\gamma_o max$）將如（4）所示：



（圖 4）$\frac{R}{H}$ 值與灘波水深之關係（WES）

$$\gamma_o max = \sqrt{\frac{2\alpha}{\pi}}\frac{\sin^2\alpha}{\pi} \cdots\cdots\cdots (4)$$

上式之 α 表斜面與水面之角度。如一併考慮及波浪之縱剖面，則最大峻度 $\frac{d_y}{d_x}$ 可達 $\tan\alpha$， 更大之峻度，則入射波（Incident Wave）將行破碎或因能量之部份消失而無能有全反射。渠又對反射能 R（Reflecting Power）作如下之定義，即反射波波高與入射波波高之比值，可以式（5）表之：

$$R=\frac{H_1}{H} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (5)$$

茲以 γ_o 表深水波之峻度，γ_o 表全反射時之峻度則部份反射能R'應為：

$$R'=\frac{\gamma_o max}{\gamma_o}\ ,\quad R'<1 \cdots\cdots\cdots\cdots (6)$$

Miche 復說明，反射波之水流，其體積因紊流之影響，而略有減小，故有相當理由可引入一係數 ρ。在平滑堤面時，其值為 0.8～0.9 故有效反射能應為：

$$R=\frac{H_1}{H}=\rho R'=P\frac{\gamma_o max}{\gamma_o} \cdots\cdots\cdots (7)$$

Iribarren 及 Nogales 氏，曾在不同假設下，予臨界坡度（i, Critical. slop）之定義如下：坡度在一臨界值時，減小之則發生碎波，增大之則發生反射波（SurgingWave），可以式（8）表之。

$$\tan\alpha=i=\frac{8}{T}\sqrt{\frac{H}{2g}} \cdots\cdots\cdots\cdots (8)$$

於一已定波浪，若斜面之坡度如上式，則反射能為：

$$R=\frac{H_1}{H}=\frac{1}{2} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (9)$$

再自圖 2 可知，於大多數灘岸情況，能作 $H \doteqdot H_o$ 之假設，故式（8）成為：

$$\gamma_o=\frac{i^2}{5.1} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (10)$$

Miche 氏指出其公式，於坡度極平緩之情形下，精確度不及在陡坡時之佳，茲設 $\alpha \geq 11°$（即 $\tan\alpha = i \geq \frac{1}{5}$）則式（4）之 $\gamma_o max$ 值為：

$$\gamma_o max=\frac{i^2}{8.1} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (11)$$

又因 Irribarren 式中之 γ_o 係適用於 $\frac{H_1}{H}=\frac{1}{2}$ 之條件，故若將式(10)及(11)代入即得：

$$\frac{H_1}{H}=\frac{1}{2}=\rho\frac{\frac{i^2}{8.1}}{\frac{i^2}{5.1}}$$

$$\rho=\frac{8.1}{2(5.1)}=0.8\cdots\ (12)$$

因式（12）中ρ值爲0.8，此表示 Irrib 式與 Miche 式可以對照。

前已提及，海堤坡設計應使入射波之反射爲最小。自上述數式得知，在理論上，若$\gamma_o>\frac{i^2}{5.1}$，則入射波可發生碎波而反射能小於$\frac{1}{2}$。因之，求證在實際情形中，有無臨界坡度之存在，爲一重要步驟。表（1）示若干種水工試驗之結果。

表 1　Irribarren氏與Nogales之試驗結果

波浪性質		測定之坡度　$i=\tan\alpha$			計算坡度 (Iribarren)	計算坡度 (Miche)
H (cm)	T (sec)	全碎波	全反射	平均值	$i=\frac{8}{T}\sqrt{\frac{H}{2g}}$	$\gamma_o\max=\sqrt{\frac{2\alpha}{\pi}}\cdot\frac{\sin^2\alpha}{\pi}$
5.5	0.66	0.42	0.86	0.64	0.66	0.80
4.5	0.92	0.29	0.59	0.44	0.42	0.50
5.5	1.00	0.33	0.49	0.41	0.38	0.46

自表（1）可知，自 Irhibb. 式計算得者與全反射及全碎波之平均值很接近，Match氏則與全反射波者接近。

Caldwell 氏在"波浪作用下之渠道設計"一文中，有如下之論述當試驗坡度增大時，有若干處所有反射波之發生，試驗情形如下：

波浪爲6呎～7秒（實物）於1：3坡面上未發現反射波；波浪爲6呎～14秒，於1：5坡面亦無過甚之反射波，茲以上述波浪條件代入 Irrib 式，若所得坡度亦顯示無過甚之反射波者，則表示Irrib. 式能與上文對照。表2所示其確如此。

表 2　Caldwell 氏之試驗結果

波浪性質		坡度(試驗)	坡度(計算) $i=\sqrt{\frac{H}{T^2}}$
H(ft)	T(sec)		
6	7	0.333	0.349
6	14	0.200	0.175

Granthem氏曾首對波浪在堤波上方湧升(up-rush) 現象作試驗。渠曾研究，波浪在何種坡度之斜面上發生碎波或湧浪。並得結論即 $i=\sqrt{5.12\gamma_o}$ 認爲碎浪與湧浪之區分點，表3爲其試驗結果，自之亦可知 Irrib 式之準確性甚佳。

表 3　Granthem 氏之試驗結果

波浪性質		發生碎波時，所測最長坡度（度）	Irib 式計算得波度（度）	發生湧浪時，所測最短坡度（度）
D/L	H/L			
0.066	0.012	—	21.5	15
0.148	0.035	25	26.5	30
0.218	0.071	30	33.0	36
0.434	0.112	35	37.0	45

BEB(Beach Erosion Board)對波浪之湧升問題有作系統性之試驗，筆者曾以 Irrib. 之臨界坡度公式於多數上述試驗，求得式 $i=\sqrt{\frac{H}{T^2}}$，可爲平滑而不透水性之堤坡之臨界坡度之約值。

茲可就 Irrib 式作下式之結論：

$$i=\frac{8}{T}\sqrt{\frac{H}{2g}}\doteqdot\sqrt{\frac{H}{T^2}}\cdots\cdots\cdots\ (13)$$

上式可作爲碎波與湧浪之分野，在設計上，宜使堤波小於$\sqrt{\frac{H}{T^2}}$值。如是反射波可減小而能量之消失則較大。

四、波浪在堤坡上之湧升

1. 總　說

波浪與結構或灘岸碰撞而發生碎波，一部份能量因紊流而消失，餘則沿堤坡湧升（up-rush）轉變爲位能。本節所論，暫限於單一坡波，平滑而不透水之堤坡，其他因素如糙率，空隙率及邊坡形式

等，將另行說明之。

分析問題時，須用到下述各變數：

R＝湧升高度（垂直方向）

H＝波高，並設$H \doteqdot H_0$

L＝波長

D＝水深

C＝波速，即L/T

i＝結構之臨海一面之邊坡，即$\tan\alpha$

E＝波浪能量

ρ＝液體密度

μ＝液體粘度

由上述各變數所組成，影響湧升高度之無尺度參變數爲：

$$\frac{R}{H},\ \frac{H}{L},\ i,\ \frac{H}{D},\ \frac{H^2C^2\rho}{E},\ \frac{HC\rho}{\mu}$$

其中，$\frac{HCP}{E}$一項爲 Reynold Number 在實用上，非於極平坦之坡度，其影響不大，可略而不計。$\frac{H^2C^2\rho}{E}$ 約與 $\tanh\frac{2\pi D}{L}$ 相當，故可得通式如下：

$$\frac{R}{H}=f\left(\frac{H}{L},\ i,\ \frac{H}{D},\ \tanh\frac{2\pi D}{L}\right) \cdots\cdots (14)$$

應用水工試驗解決上式時，可逐次變動一條件，而維持其餘者不動，並應注意以下二種情形。

A. 波浪在結構或灘坡上所發生者究爲碎波或湧浪

B. 如已判明爲碎波，則應判明係發生在堤前灘面或堤坡之上

如屬前者，則湧升之計算應視爲組式堤坡(四一5)

2. 碎波

碎波與湧浪在力學性質方面完全不同，前已證得當 $\tan\alpha<\left(\frac{H}{T^2}\right)^{1/2}$時，波浪將在堤坡上坡碎。

WES (Waterways Experiment Station) 試驗結果指出，參變數$\frac{H}{D}$對湧升之影響甚小，若碎波係發生在堤坡上者。BEB之試驗亦證明如此。但此並非謂，水深D一因素無關重要，因在本質上，水深影響波浪之性質甚大。

WES及BEB 之試驗均指出，在一定之波浪條件下，於不透水性堤坡，湧升直接與坡度成比例，即：

$$\frac{R}{H}=C\tan\alpha \cdots\cdots (15)$$

如坡度已定，則上式之C值爲$\left(\frac{H}{L}\right)^{-\frac{1}{2}}$之函數，即：

$$\frac{R}{H}=f\left(\frac{H}{L}\right)^{-\frac{1}{2}} \cdots\cdots (16)$$

再設坡度及波浪峻度均屬已定，則WES，BEB 及 Granthem 之試驗均指出式（17）可成立：

$$\frac{R}{H}=f\left(\tanh\frac{2\pi D}{L}\right)^{-\frac{1}{2}} \cdots (17)$$

以上諸式（14），（15），（16），及（17）可綜合爲式（18）即：

$$\frac{R}{H}=K_1\left(\frac{H}{L}\right)^{-\frac{1}{2}}(\tan\alpha)\left(\tan\frac{2\pi D}{L}\right)^{-\frac{1}{2}}\left(\frac{H}{D}\right)^0 \cdots\cdots (18)$$

又因$\frac{H}{T^2}=5.12\frac{H}{L}\tanh\frac{2\pi D}{L} \cdots (19)$

故得 $\frac{R}{H}=\frac{K\tan\alpha}{\left(\frac{H}{T^2}\right)^{1/2}} \cdots\cdots (20)$

分析全部試驗資料得知，K值約爲2.3。故式（20）成：

$$\frac{R}{H}=\frac{2.3\tan\alpha}{\left(\frac{H}{T^2}\right)^{1/2}}$$

但 $\left\{\begin{array}{l}\left(\frac{H}{T^2}\right)^{1/2}>\tan\alpha \cdots\cdots (21)\\ H\doteqdot H_0\end{array}\right.$

3. 湧浪

若$\left(\frac{H}{T^2}\right)^{1/2}<\tan\alpha$，則進抵結構前之波浪不致破碎而生湧浪，其反射能大於$\frac{1}{2}$，並自試驗得知，若式（21）中之$\left(\frac{H}{T^2}\right)^{\frac{1}{2}}$值等於$\tan\alpha$，$\frac{R}{H}$非爲2.3而爲3.0，即：

$$\frac{R}{H}\doteqdot 3.0 \cdots\cdots (22)$$

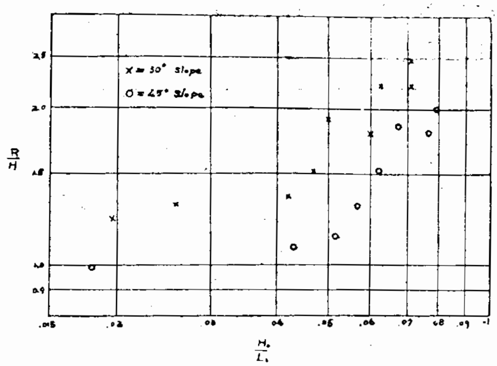
在理論上並可假定，當前進波浪之峻度爲γ_0 max時，將發生全反射，其時若堤坡爲直立面，則湧升可以 Sainflow 氏重複波公式表之即：

$$\frac{R}{H}=1+\frac{H}{L}\coth\frac{2\pi D}{L} \cdots\cdots (23)$$

Miche 氏更指出，於45°之堤坡，大多數之入射波均作全反射，因γ_0罕有大於 0.11 者，故理論之湧升值可以式（24）表之。

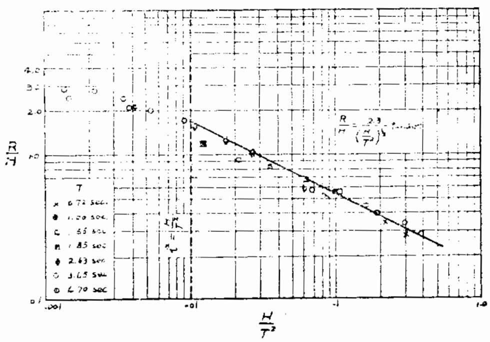
$$\frac{R}{H}=\sqrt{\frac{\pi}{2\alpha}} \cdots\cdots (24)$$

Granthem 及 Sibul 氏之資料亦證明上式與眞值接近。若堤坡大於½則湧升通常隨γ_0之減小而俱減，此可自圖5見之。



（圖 5）湧浪之$\frac{R}{H}$值與$\frac{H_o}{L_o}$之關係(Cranthem)

另一顯明之事實為，坡度減小時，因摩阻而致能量消失將增加。若坡度已定，則γ_o值將有一類似臨界值之情形存在，其時之$\frac{R}{H}$為最大；過此範圍，$\frac{R}{H}$即隨γ_o而俱減。BEB試驗結果中，最大之$\frac{R}{H}$值約為5，除非在發生潮波(Tidal wave)的情形下，此種波浪峻度殊非實地所應有，設坡度 $\tan\alpha > \frac{1}{2}$，$(\frac{H}{T^2})^{\frac{1}{2}}$略比 $\tan\alpha$ 為小，則$\frac{R}{H}$值有微增，且將保持在最大數值上，最後才隨γ_o而俱減，此情形明示於圖6。

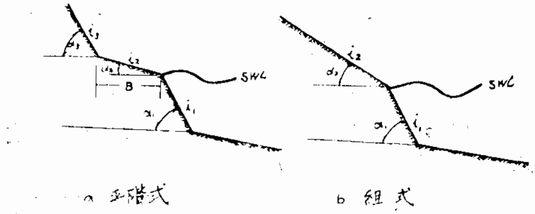


（圖 6）1：10平滑不透水灘坡與$\frac{R}{H}$值（BEB）

因暴風浪時γ_o常於0.05故若堤坡$\alpha \leqq 45°$，則在設計上$\frac{R}{H}$值採用3之數，已屬保守。若$\alpha > 45°$式（21）可以應用。

4. 組式堤坡與平階式堤坡

基於實地需要或經濟上理由，海堤臨海一面之堤坡有須採用組式（Composite type）或平階式（Barm type）者，如圖7。



（圖 7）組式與平階式堤坡

近年英國海堤設計亦大多採用平階，如 Pitt Level 其 Dymchurch 堤等均是。荷蘭為最早採用平階式設計者，且著有成效，1953荷蘭暴風浪之後，曾對處於同一波浪條件下，二種型式之海堤予以考察，一為具有寬廣平階者，一為狹窄之平階者。結果為具有寬廣平階者為佳，故自水力學觀點，則平階之設計顯屬有利。茲仍在平滑及不透水性之基本條件下，分別說明如下。

5. 組式堤坡

如圖 7b，組式坡可視為一種平階式者之簡化。其設計應以暴風浪時之情形為準，但亦與經濟及結構重要性有關。坡度 i_1 應達充分高度，俾進抵其前之波浪均可破碎，亦即應與$\frac{H}{T^2} > (i_1)^2$ 之條件符合。坡度之破折點應在可能最高水位之上。

若 $i_2 > i_1$，則湧升減小，其 $\frac{H}{T^2}$ — $\frac{R}{H}$ 關係曲線將在下述一曲線範圍內，且與之平行，此均於WES及 BEB 之試驗結果中獲得證明如圖 8。

$$\frac{R}{H} = \frac{2.3 i_1}{(\frac{H}{T^2})^{1/2}} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (25)$$

$$\frac{R}{H} = \frac{2.3 i_2}{(\frac{H}{T^2})^{1/2}} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (26)$$

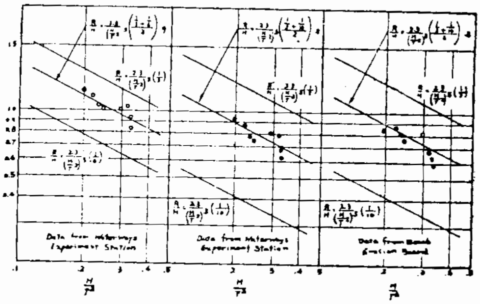
式（25）適用於海面在破折點之下者；反之，應採用式（26）

無論堤坡為組式或平階式，良好之設計，平階或坡度破折點必須應在可能發生之最高水位之上，以期能有最大之消耗但建造費用則最省，Bruuh氏曾作如下之申述："比較各種高度不同之平階設計，證實其高度應與最高水位齊平或稍高，尤以具有粗糙面之堤坡為然"。荷蘭工程界遵守此法則。

堤坡之有破折點，亦可增大波浪能量之消失，其理由為紊流亦因之增大。但仍與坡度差值，即$\alpha_1 - \alpha_2$有關。當水位正在破折點時，$\frac{R}{H}$值可以式(27)表之，即：

$$\frac{R}{H} = \frac{2.3}{\left(\frac{H}{T^2}\right)^{1/2}} \left(\frac{\tan\alpha_1 + \tan\alpha_2}{2}\right) S \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (27)$$

式中，S爲（$\alpha_1 - \alpha_2$）之函數，若$\alpha_1 = \alpha_2$卽成式（21）於圖8．



（圖 8）組式堤坡之$\frac{R}{H}$與$\frac{H}{T_2}$之關係

就已有資料憑目光作曲線，再經式（27）之處理求S值，結果如下：

S	坡 度
0.8	1:3（i_1）——1：10，（i_2）
0:8	1：10——1.3
0.9	1：3 ——1:6

一重要之啓示如下：坡度1:3——1:10之試驗結果，正與1:10——1:3者同，故若灘岸之實地情形能確使波浪破碎在較小之坡度上者，築堤材料恆可因而節省。如圖9之例。

（圖 9）組式堤坡時築堤材料之節約

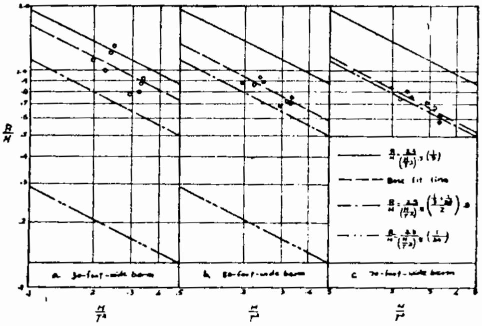
若以1:10——1:3代替1:3——1:10，影線部份卽爲所節省下者。

6. 平階式堤坡

若實地情形不允許採用組式堤坡，有時亦可採用第三段坡度，i_3 以抑制湧升高度，如圖7a，中間段之坡度 i_2 卽相當於平階。平階之坡度，在對比上，應爲平坦，其與 i_2 坡之破折點應在最高水位之上。

茲討論平階之寬度B對抑制湧升之效果於下

Delft 水工試驗室指出，$\frac{R}{H}$ 值與（$1-\frac{B}{L}$）值成比例，$\frac{B}{L}$一表平階寬度與波長之比值。WES之試驗如下：堤坡 $i_1 = 1:3$，$i_2 = 1:20$，$i_3 = 1:3$；波浪在 i_1 坡上破碎；波高及週期則保持不變；惟一變數爲平階寬度，分30—50—及70—呎三種。試驗結果示於圖10。



（圖10）$\frac{R}{H}$與平階寬度爲關係（WES）

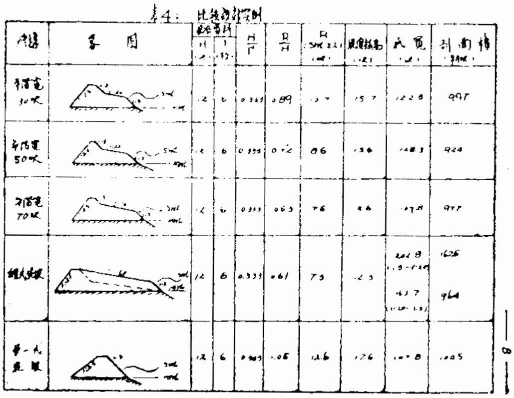
卽$\frac{R}{H}$值與$\frac{B}{L}$值成反比，波長雖非固定，但相差不大。相當於階寬30—，50—及70-呎之$\frac{B}{L}$平均值分爲0.18，0.31及0:43。$\frac{B}{L}$爲0.43時，效果與組式堤坡1:3—1:20者相當；後者之計算採用式（27），S值爲0.8。$\frac{B}{L}$爲0.18時，平階之優點未見發揮。設計時，須憑籍水工試驗以求最佳設計，但一般通則如式（28）：

$$\frac{B}{L} \geq \frac{1}{5} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (28)$$

茲再說明坡度i_2之効果如下，根據Bruun之試驗，則i_3之重要性很小，英國 North Keht 堤之試驗結果，爲在平階內端設一直立牆，結果堪稱理想，因其他不容許有寬大平階之設計也。只須維持式（28）之條件，則於平階內端設一直立牆或陡坡（1:3或1:2）均可獲滿意之効果。迄今爲至尚無滿意之設計 i_3 坡方法，只能期望水工試驗之繼續研究。

平階雖非萬能，但在適當之設計下，不難體認到其對節省築堤材料及增加結構安全方面均有効果。表4爲一實例。引用 WES 之試驗結果圖（10）及式（21）（27），設計五種堤坡並計算其湧升。堤坡爲一種單一坡，一種組合坡三種平階坡，如表4。各式設計均以同一之波浪條件（H＝12呎，T＝6秒）設計不溢流之堤頂高度。暴風浪時之海面假定爲平均海面之上5呎，堤頂寬度均爲11呎，堤內坡度爲1:2.5，設計結果示於表4，自之可得如下結論。組合坡之堤頂最低，但堤基寬度地大；單一坡者正與之相反，組合坡堤之剖面積爲

最大與最小，視堤外坡之為1:3 — 1:20 或 1:20 — 1:3 而定，上述各式之選擇，復與實地情形有關，例如某些地區恆因須要保持良好之風景視界起見，須採用低堤者，則以組合坡或平階寬為70呎者為宜，二者對抑制湧升之効果約相等。換言之，於70呎寬之平階之內端設一4 呎高之直立牆，其効果與76呎寬度之1:20坡度之堤身相同。



五、粗糙率與透水率對湧升之影響

1. 粗糙率

增加堤坡之粗糙程度，可以增加波能之消耗而增大抑制湧升之効果，但此並非每一結構均可適用。迄今為至，尚無充分資料，以作結論，但以下所述可為一種參考。

因坡面粗糙而生之紊流傳播剪力，其通式如式（29）：

$$T=\rho KV^2 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (29)$$

式中：

T＝剪應力

ρ＝液體密度

K＝因數，與坡面粗糙狀況，如粒狀大小及間距等有關。

V＝底層流速

一種人為粗面係以立方體構成者，自試驗以求最佳之間距，俾對波能之消耗有最大之效果。如圖11，Johnson氏之試驗指出，當$\frac{b}{a}=4$時，最大之粗糙率應使$\frac{c}{a}=12$。但關於高度a與波高H_o之關係尚少有所認識，Bruun氏則提議應用，$\frac{H_o}{a}=3\sim4$之關係。另一種重要見解為，粒狀應大至"可感覺"程度，但亦無更具體之解說。North Kent 海堤之水工試驗，證實Johnson指出之原則有大效果；並得知過小之階級式粗面工無多大效果。階級式面工，不能減小反射，其對抑制湧升之效果，視階級高度與波高之比值而定。

（圖11）長方塊式人為粗面工簡圖

Mitch 氏分析得，湧浪（未破碎）沿坡面湧升時，底層水質點之流速得式（30）。

$$V_{max}=\frac{H\pi}{\sin\alpha}\sqrt{\frac{g}{L}} \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (30)$$

坡度減小，流速之增大率亦愈甚，為說明此種觀念起見，表5示γ_o與其相當之Vmax值。

表 5　自已知坡度計算 Vmax（Miche）

α(度)	90	45	30	18	15	10	5	2	1
Vmax	1	2	3.46	7.25	9.45	17.2	48.5	192	542

粗面工之效果，於平緩坡度時愈為顯見，因其時流速之增大率愈應有所抑制，若應用於寬度之平階，效果更為顯著。人為粗面工之建造費用常很高昂，設非運用得當，難期有效，尤其於暴風浪時為然，而其複雜之因素息息相關，於設計時應有水工試驗之配合。

BEB 曾作微粒式粗面工之試驗，即在混凝土板上平舖砂層，茲只就碎波時之情形，即$\frac{H}{T^2}>i^2$，論之如下：

$$\frac{R}{H}=\frac{2.3}{\left(\frac{H}{T^2}\right)^{1/2}}(\tan\alpha)(\gamma)\cdots(31)$$

式中，γ 表粗糙率。式（31）與平滑面坡而不透水者相當，只多一因數而已。表 6 示BEB試驗關於砂之粒徑，坡度及γ值之結果。

表 6　粗率與砂粒徑，灘坡之關係

砂 粒 徑	(r) 坡度 1:10	(r) 坡度 1:30
平　滑	1.00	1.00
0.2 mm	0.96	0.89
1.0 mm	0.85	0.78
2.0 mm	0.82	0.71
3.4 mm	0.76	0.64
青　石	0.70	0.49

自表6之結果得知，堤坡或自然灘坡所予粗糙率之重大影響。Sibul氏曾使用相當於Manning流速公式n＝0.13之粗率於1:2及1:3堤坡，此等程度之粗率雖大於同表中青石所有者，但二者之γ值，經計算所得均約爲0.80，由上可知，坡度較大之堤坡粗率對抑制湧升之效果較小，

實際上，具有不透水性及粗面二條件之堤坡型式，僅有混凝土塊或階級式二種。爲期有完善之設計起見，事前應有廣泛之試驗研究。

2. 透水率

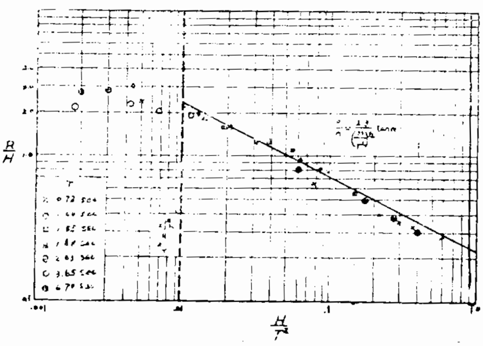
試驗結果指出，結構之空隙對抑制湧升之效果極大。Caldwell指出，能量之吸收率與空隙率成直線比例，以迄空隙率達50%爲止，其時，約有90%之波能可被吸收。又入射波之能量被吸收，亦與結構之厚度有關，例如，透水之直立堤，當$\frac{W}{D}>2$時，吸收能力卽無能再增加，$\frac{W}{D}$指堤體厚度與水深之比值。

於單一堤坡，綜合透水率及粗糙率之結果，則$\frac{R}{H}$值可以式（32）表之卽：

$$\frac{R}{H}=\frac{2.3}{\left(\frac{H}{T^2}\right)^{\frac{1}{2}}}\tan\alpha(\gamma)(P)\cdots\quad(32)$$

式中：γ 表與粗糙率有關之因數，P表與透水率有關之因數。

式（31）及（32）一見之下，似顯過份簡單而不足以解釋如許複雜之現象。但事實確是如此，如圖12之試驗結果與式（33）極爲接近。



（圖12） 1：10粗糙，透水灘波與$\frac{R}{H}$值（BEB）

$$\frac{R}{H}=\frac{2.3}{\left(\frac{H}{T^2}\right)^{\frac{1}{2}}}\left(\frac{1}{10}\right)(0.74)\cdots\quad(33)$$

筆者曾就BEB試驗資料，計算得P及γ值表示於7。表中有青石一種，其空隙率之確切數字雖不得而知，但總應比砂層爲大，其湧升之被抑制者達54%。再自坡度爲1:30之一項考察之，透水性對抑制湧升之效果，亦以較平坦之坡度爲大。

表7　空隙率與砂粒徑及灘坡之關係

砂粒徑	坡度 1:10 無空隙(γ)	坡度 1:10 空隙(γ)(P)	坡度 1:10 (P)
平　滑	1.00	1.00	1.00
0.2 mm	0.96	0.91	0.95
1.0 mm	0.85	0.82	0.96
2.0 mm	0.82	0.74	0.90
3.4 mm	0.76	0.65	0.85
青石	0.70	0.38	0.54

砂粒徑	坡度 1:30 無空隙(γ)	坡度 1:30 空隙(r)(P)	坡度 1:30 (P)
0.2 mm	0.89	0.77	0.86

有一應注意而愼重之事實，卽具有空隙率之材料於受波浪作用時，其强大之浮壓力有可能導致結構之失敗，故有關結構安定性問題，應事先作水工試驗。

除於前段所述之混凝土塊或階級式堤坡不兼具透水性與粗糙性條件外，其他大多數堤坡均可將二因素併計之，兹以$\oint$表之：

$$\oint=(\gamma)\ (P)\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\quad(34)$$

$\frac{R}{H}$值在理論上卽爲$\tan\alpha\left(\frac{H}{T^2}\right)^{-\frac{1}{2}}$之函數，故於單一堤坡，其湧升值可以式（35）表之：

$$\frac{R}{H}=\frac{2.3\tan\alpha}{\left(\frac{H}{T^2}\right)^{\frac{1}{2}}}(\oint)\ \cdots\cdots\cdots\quad(35)$$

P值已示於表7試驗結果，並指出此可並用於碎波或湧浪方面。

表4之實例雖指出，在不透水性的條件下，1:3

單一坡之設計可與具有70呎寬平階者比美。但自上述討論，即透水率與粗率二因素對湧升之抑制，於坡度較平者較佳之說，1:3單一坡者即難與平階式者並論矣。

六、實　　例

本例爲美國Florida州 Okeechobee 堤之比較設計。堤坡材料爲不透水性者。堤坡有兩種，一爲單一坡，坡度爲1:3或更小；一爲組合坡，坡度爲1:10——1:3。暴風浪時，淺水波之峻度，$\gamma_o > 0.04$。有効波（Significant Wave）之性質已知爲：

$$\frac{H}{T^2} = \frac{1}{4.8} \cdots\cdots\cdots\cdots (36)$$

玆先求得臨界坡度如次：

$$i = \sqrt{5.12\gamma_o} \cdots\cdots\cdots\cdots (10)$$

故知碎波係發生在堤坡之上，因之，湧升應自式（21）及（27）計算之。

以式（36）代入式（21）得：

$$\frac{R}{H} = 5\tan\alpha \cdots\cdots\cdots\cdots (37)$$

以式（36）代入式（27）得：

$$\frac{R}{H} = 4.5\left(\frac{\tan\alpha_1 + \tan\alpha_2}{2}\right) \cdots\cdots (38)$$

七、結　　論

本結論均自分析水工試驗結果而來，但有二點應予注意，一爲模型之尺度効果（Scale effect）問題；一爲試驗用波浪係自機械發動者，此與實地之"風浪"亦有不同。於設計上，本文之波浪可作爲實地之有効波（Sgnificant wave）處理之。

目下研究工作仍在進行，其中不少正在以"風浪"及較大之波浪槽研究之，筆者以爲本文所論者多爲基本概念，應無多大變動，僅常數或有須變易者。玆將前文所述作結論如下：

（1）應盡可能使反射波減爲最小。

（2）爲將反射波減爲最小起見，堤坡（臨海）應爲：

$$i < \frac{H}{T^2}$$

（3）於單一式堤坡而不透水者，湧升可自下式計算之：

$$\frac{R}{H} = \frac{2.3\tan\alpha}{\left(\frac{H}{T^2}\right)^{1/2}}, \quad \begin{cases} i^2 > \frac{H}{T^2} \\ H \doteqdot H_o \end{cases} \cdots (21)$$

（4.）如爲湧浪，設計上之湧升約爲：

$$\frac{R}{H} \doteqdot 3, \quad \begin{cases} i^2 > \frac{H}{T^2} \\ H \doteqdot H^o \end{cases} \cdots\cdots\cdots\cdots (22)$$

（5）組式堤坡，水位正在破折點上者：

$$\frac{R}{H} = \frac{2.3}{\left(\frac{H}{T^2}\right)^{1/2}}\left(\frac{\tan\alpha_1 + \tan\alpha^2}{2}\right)S,$$

$$\begin{cases} i^2 < \frac{H}{T^2} \\ H \doteqdot H_o \\ S \doteqdot 0.8 \sim 0.9 \end{cases} \cdots\cdots\cdots\cdots (27)$$

（6）平階可抑制湧升，但寬度應有：

$$\frac{B}{L} \geq \frac{1}{5} \cdots\cdots\cdots\cdots (28)$$

（7）人爲粒面工之効果於較平緩之堤坡較大，於單一式堤坡：

$$\frac{R}{H} = \frac{2.3}{\left(\frac{H}{T^2}\right)^{1/2}}\tan\alpha\,(\gamma),$$

$$\begin{cases} i^2 < \frac{H}{T^2} \\ H \doteqdot H_o \end{cases} \cdots\cdots\cdots\cdots (31)$$

（8）於單一式堤坡，粗面而透水者：

$$\frac{R}{H} = \frac{2.3}{\left(\frac{H}{T^2}\right)^{\frac{1}{2}}}\tan\alpha\,(\oint)$$

（9）三角錐（Tetrapods）或其類似結構，爲理想之材料。因其兼具粗率，透水，互連性及尺度可任意設計等優點。