

捨石堤의 安定에 影響을 미치는 파라미터 Parameters Affecting Stability of Rubble Mounds

趙 鏞 七* 譯

1. 緒 論

이 論文의 內容은

1. 急上昇(Uprush) 및 急下降(Downrush)에 의한 힘
2. 透水性의 重要性
3. 波의 同調(均衡)現象
4. 被覆블록間 및 被覆石과 下部基礎層間의 摩擦
5. 傾斜形態
6. 實際設計原則

으로서 이들 要素를 檢證하고 實設計의 原則으로 結論을 導誘하였다.

2. 捨石堤의 安全性 및 崩潰

自然石 또는 콘크리트의 被覆石으로 築造된 捨

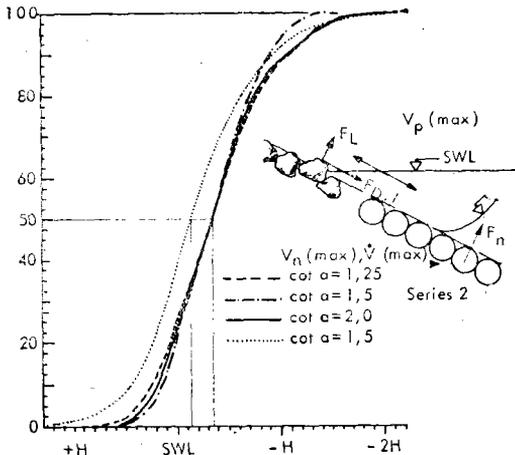


Fig. 1. Cumulative Distribution of Damage along Breakwater Face (4) Series 1 and 2

拔萃: Journal of The Waterways Harbors and Coastal Engineering Proceedings The American Society of Civil Engineers. MAY 1976

* 本學會 干拓技術研究班

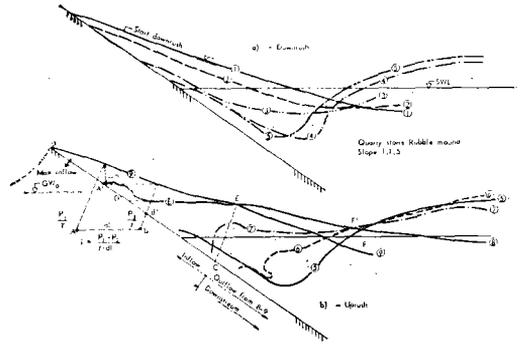


Fig. 2. Water Wedge Profiles during Uprush and Downrush

石堤의 安定에 대하여 여러가지의 設計公式이 있으나 崩潰에 대한 周期가 短い 原因의 解明이 比較的 없었으며 波高에 關해서 設計波高의 定義에 대해서 努力이 集中되어 왔다.

崩潰의 位置에 對하여 模型實驗에서 滿水位의 波力에 의한 波浪의 退進하는 곳 또는 그時의 가장 낮은 波浪의 水位에서 理想의 으로된 被覆球形體가 崩潰하였다고 證明되었다.

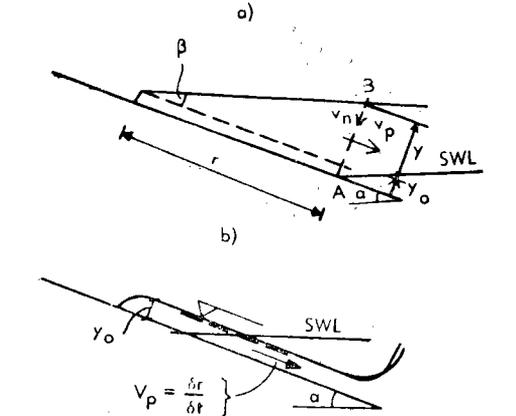
Fig.1은 捨石堤 傾斜面에 對하여 廣範圍하게 實驗한 崩潰된 分布曲線이다. 崩潰는 海面水位(Sea-water Level) (SWL)에서 始作되고 그의 바로 下部에서 가장 顯著하였다.

3. 急上昇 및 急下降

Miche (18, 19)에 의한 論文은 LeMéhauté(17)가 한것과 같이 定常波 單에 關聯된 것이다.

Battjes가 近來에 發見한 것은 非定常波에 의한 上昇(Uprush)에 對하여 統計的 解析 結果를 提示하였다.

Fig.2는 필름으로서 記錄된 急上昇 및 急下降 (uprush and downrush)을 나타낸 것이며 平均流速은 SWL에서 傾斜度 V_p 에 對하여 水平이고 表面流速은 SWL의 傾斜에 直角이고, V_n 를 計算하였다. (4).



$$V_p = \frac{\partial r}{\partial t} + \frac{r^2}{y_0 + r \tan \beta} \cdot \frac{1}{2 \cos^2 \beta} \cdot \frac{\partial \beta}{\partial t}$$

$$= V_p(r) + V_p(\beta)$$

when $\beta \rightarrow 0$ then $y \rightarrow y_0$, $\frac{\partial \beta}{\partial t} \rightarrow 0, \rightarrow V_p(\beta) = 0$

$$\lim |V_p|_{\beta \rightarrow 0} = \frac{\partial r}{\partial t} \quad \frac{\partial \beta}{\partial t} \rightarrow 0$$

Fig. 3. Model for Computation of Velocities at SWL Parallel and Normal to Slope

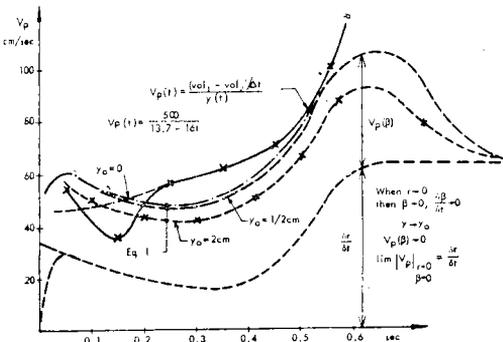


Fig. 4. V_p as Function of Time during Downrush (1 cm=0.39 in.)

Downrush 동안 水位의 傾斜는 捨石堤傾斜 (Fig.2의 4 및 5 曲線)에 水平이 될 때까지 높아진다

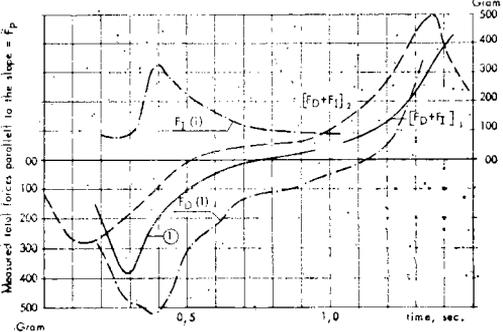


Fig. 5. Measured Force Distribution Curves (1g=0.035 oz)

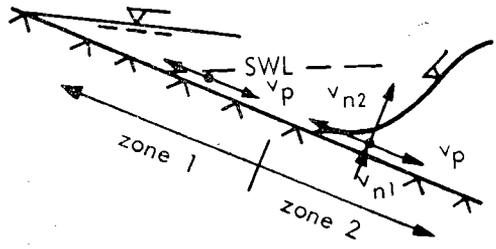


Fig. 6. Wave Force Distribution on Breakwater Slope

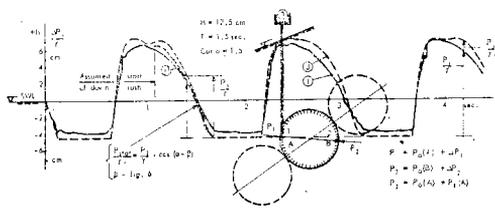


Fig. 7. Pressure Distribution Measured at Front Gage A and Elevation of Water Table above A (1 cm=0.39 in.)

Fig.3(a)의 與件은 SWL 때의 流速計算에 대하여 選定한것이다.

Fig.3(a)의 A-B斷面에서 平均流速은 다음과 같이 表現된다

$$V_p = \frac{\partial r}{\partial t} + \frac{r^2}{y_0 + r \tan \beta} \cdot \frac{1}{2 \cos^2 \beta} \cdot \frac{\partial \beta}{\partial t}$$

$$= V_p(r) + V_p(\beta) \dots \dots \dots (1)$$

여기서 $V_p(r)$ 및 $V_p(\beta)$ 는 r 및 β 가 各已 變化하므로 인한 流速이다. [[Fig.3(a) 参照]

$$V_p = \frac{\partial r}{\partial t} + \frac{r^2}{y_0 + r \tan \beta} \cdot \frac{1}{2 \cos^2 \beta} \cdot \frac{\partial \beta}{\partial t}$$

$$= V_p(r) + V_p(\beta) \dots \dots \dots (1)$$

여기서 $V_p(r)$ 와 $V_p(\beta)$ 는 r 와 β 의 變化로 인한 유속 들이다. [see Fig.3(a)].

[Fig.3(a)]의 傾斜에 대하여 直角되는 水平面의 流速은 Ref 4에 따라 다음과 같이 記述된다.

$$V_n = r \frac{\partial \beta}{\partial t} \dots \dots \dots (2)$$

여기서 β 分布線과 그의 推定延長한 것을 Fig. 4에 表示하였다. d/β 値는 β 가 다음과 같은 與件限界로 O(zero)으로 誘導接近되면서 接近한다.

$$\lim |V_p|_{\beta \rightarrow 0} = \frac{\partial r}{\partial t} \dots \dots \dots (3)$$

$$V_p > 0 \quad F_p > 0 \quad F_n < 0$$

NOTE 1: Phase difference between pressure and inflow (grain pressure) depend on the permeability of the core material.

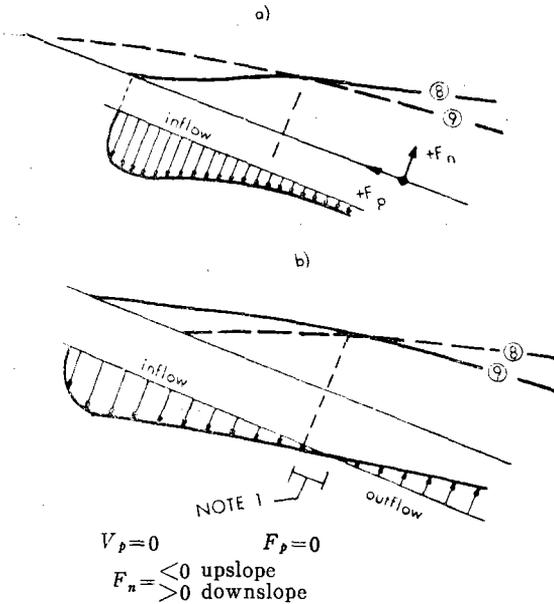


Fig. 8. Inflow and Outflow from Mound Versus Wave Pressure

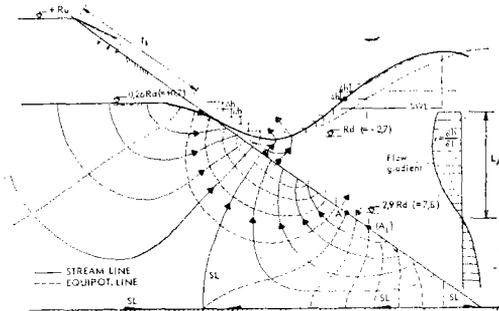


Fig. 9. Flow Net and Distribution of Outflow Gradients for "Stationary Conditions" at Maximum Downrush, Slope 1:1.25 - Location of Point of "Outflow-Inflow"

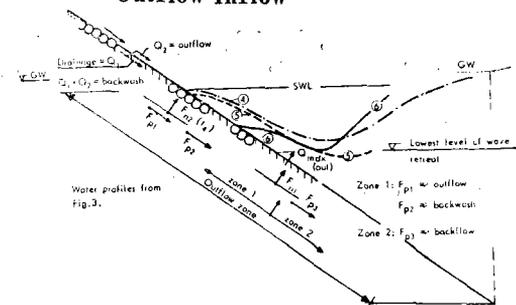


Fig. 10. Wave Profiles, Outflow Conditions

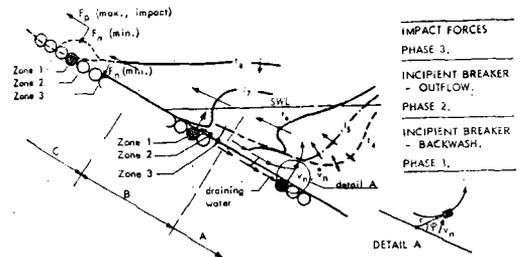


Fig. 11. Force Distribution for Phase 1, 2, and 3

水理試驗에 의한 흐름狀態 및 힘의 評價

"捨石堤 水理 現象"의 理解를 더 돕기 위하여 球形體로 構成된 捨石堤에 대하여 實驗을 하였다. (5) uprush에 대하여 $F_p = F_D$ 總傾斜水平力 (吸出力-drag) + F_1 (이너시아-2次모어먼트)는 球形體가 潛入한 直後가 가장 커지며 그 反面에 V_p (SWL의 傾斜에 대하여 平行되는 流速) 및 相應한 加速度는 若干위에서 커졌다. (Fig.5의 實驗에서 F_p 및 F_1 參照)

主로 물이 downrush 하는 동안에 물의 球形體가 潛入되면서 F_p 는 最大로된다. 그러므로 露出된 傾斜面을 2個 領域으로 區分할 수 있다. (Fig.6). 領域 1에서의 流速과 加速度는 主로 傾斜에 대하여 平行이며 領域 2에서의 流速分野는 急速히 變化되며 構造物에 있어서 類似靜水壓이 downrush가 뒤따른 波浪에 潛入할 때 急激히 發達된다.

이것은 換言하면 傾斜에 대하여 直角으로 強力한 흐름의 構成을 招來하게 된다 (5). Fig.7은 球形體의 兩面에 設置한 計器에 대한 壓力分布의 現象이다.

結論은 主로 downrush하는 동안의 外向力의 差異가 傾斜된 水位面에 대하여 關係된다 (5).

下位部에서의 downrush 段階에서 特殊한 흐름條件의 安定에 대하여 特別한 重要도를 갖고 있는 것이 여러차례의 實驗 結果에 의하여 證明되었다. Fig.2는 uprush 및 downrush하는 동안의 特殊한 경우의 흐름條件을 나타 낸 것이다.

水表面을 2個 領域, $D'-E$ 및 $E-F'$ 로 區分한다는 것이 實際的인 것 같아 (Fig.2(b)). E 點의 下部의 水表面은 $t_p = (8)$ 일 때 曲線 8에 該當하는 것이 最

大水位에 達하는 反面 最大水位는 처음에 曲線에 該當한 E點[即: $|t_p = (8)| = (9)|$] 以上에서는 보다 나중에 생긴다. 이것은 SWL 下의 水位에 대한 流出水는 既히 流入水가 더 上位位置에서 最大되는데 동안 uprush의 最終段階에 始作되며 循環이 되고 流出水를 招來시킨다는 것을 意味하게 된다(Fig.8).

離脫力 그것이 이너시어(inertia), 吸出力 또는 揚壓力이든 간에 最少가 되어야 한다. 이너시어 및 吸出力(7.14)의 係數에 대한 分析을 根基(7.14)로 하던 捨石堤의 露出面이 流線型이던 安全도가 增加한다는 것으로 結論지을 수 있다.

4. 透水性의 重要性

安全性에 있어 또 다른 重要要素는 被覆石, 下部層, 中心鋼土(Core) 및 필터 材料의 透水性(有孔性)이다. 이것은 流出 및 流入水의 強度뿐만 아니라 防破堤 中心鋼土內 水表面의 높이에 대한 決定要素이다. 流出水의 性質을 더욱 細密하게 試驗하기 위하여 第2次 流線網의 摩擦은 碎破直前의 波浪에 대하여 略圖를 그렸다. (Fig.9) (實驗에 根基함). 流線網에서 流出水는 強力한 平均力이 生起는 退進波의 가장 低位部에서 集中한다는 것이 나타났다.

表面과 下部基礎層에서 最大流出水의 流速은 波浪作用이 波形下位部(Fig.10- F_{n1})를 通過하는 바로 直前에서 最大되던데 보다 密接하게 흐른다.

또한 上部傾斜에서 捨石이 backrush되는 동안의 部分的으로 露出될 때에 F_n 는 捨石의 頂上部가 露出되면서 最大로 된다. (Fig.10- F_{n2})

同時에 F_p 가 最小로 되는 동안에 F_n 는 最大로 된다. 이 狀態는 波浪이 捨石의 頂上部 밑으로 退進되었을 때에 일어난다(Fig.10- F_{p1}). F_p 에서 流出水의 效果는 退進波浪의 最低位部水位의 若干 下部의 깊이 有음을 感知하였다. 더 下部 傾斜面의 F_p 는 F_n 가 最大로 되는 동안에 背面流水(backflow) 때문에 最小로 된다(Fig.10- F_{p2}). 特別하게 危險한 立場은 downrush 동안에 波浪周期과 같아질때 일어난다.

이 경우를 波浪의 同調—均衡—(resonance)이라고 부른다. 이 狀態동안에 흐름狀態를 더욱 理解하기 위하여는 碎破되는 동안의 流速分野를 再檢하므로써 얻을 수 있으며 높은 前進 流速은 頂上部에서

顯著하게 나타나며 流速은 波浪의 下位部에서는 反對이다. (5.21) 波形의 低位部分에서 流速方向의 急激한 變化는 높은 加速度를 招來하게 된다.

波浪形의 低位部分(밑)에 downrush에 流速과 外向流速이 混成되는 곳의 傾斜構造物에서의 波浪이 碎破될 때의 條件은 같아 (Fig.11). downrush 流速이 背面의 下位部끝에서 上向流速과 合致될 때 合流速의 벡타(Vector)는 回轉되며, 이것은 넓게 퍼 바쳐진 最大의 F_p 로 基因되며 거의 平常으로 指向한 流速 벡타가 最上值에 達하며 또 同時에 F_n 는 最大로 된다. 이 狀態는 다음과 같이 表現된다.

$$F_n(\max) = f(V_n^2, \dot{V}_n, B, i, P_{gr}) \dots \dots \dots (4)$$

$$F_p(\max) = f_2(V_p^2, \dot{V}_p, B) \dots \dots \dots (5)$$

여기서 V_n = 中心 鋼土로부터 流出水에 의하여 強化된 傾斜面에 대하여 直角되는 流速(Fig.11);

B = 浮力

i = 水頭기울기

P_{gr} = 필터層 바로下部 中心鋼土에서의 粒子壓力 V_p 의 값은 $\dot{V}_p = r\dot{\phi} + r\dot{\phi}$

여기서 r = 물粒徑의 曲部半徑

ϕ = r -線이 물 粒徑 및 防破堤傾斜 間의 角

構造物의 傾斜는 1 : 1.5이고 捨石과 下部基礎層의 中間에 여러가지 膜皮(membranes)를 높이가 差異나는 것으로 넓게 布設하였다. 3種의 相違된 膜皮는

- 有孔된 鐵板 (Perforated Steel plate)
- 非透水性 鐵板 (Impermeable Steel plate)
- 非透水性 프레스틱板 (Impermeable plastic Sheet)

이들의 實驗은 Fig.12에 表示되었다. 프레스틱板은 SWL 以下의 어느 程度까지의 깊이로 넓혔을 때에 破損을 惹起시키는 波高에 있어서 急激한 降下가 有었음이 현저 하다. 破潰는 언제나 最大 downrush 때에 일어난다.

가. 被覆石과 下部基礎層間의 有孔鐵板

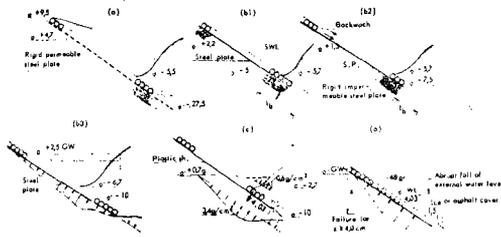
透水性 鐵板을 中心鋼土材料이 透水體에 接觸시키면 流入水와 流出水狀態의 影響이 없을 것으로 豫測할 수 있다. 그러나 球形體가 놓이기 위하여서는 더욱 水平한 바닥이 되어야 한다. Fig.12는 이러한 狀態下에 失敗한것을 圖示하였으며 이들 狀態에서의 崩潰는 Fig.12-(a)에서 波高 76 mm 때에 發生되었다.

Fig.9는 Fig.12(c)와 같이 地下水位面의 높이와 最大 downrush間의 같은 比率로서 最大 down rush 때의 狀態를 나타 낸 것이다. A點은 理論的으로 流出水가 流入水로 變化하는 곳이다. 이 경우 波浪이 退進하는 가장 低位部의 밑에 位置(78mm) 하고 있다. 萬若 透水性 鐵板을 捨石과 濾層 사이에 設置하였다면 崩潰가 惹起되는 平衡力과 波高 사이의 關係는 Fig.13-1의 曲線에 따르는 것 같아 Fig.13-2 曲線은 프라스틱板을 $L/H > L_A/H_A$ 때의 流出水 地點 밑으로 넓혔을 때 適用한다. 實驗한 條件에 대한 L_A/H_A 는 一定하며 그리고 碎破時 波浪의 同一한 傾斜度에 대하여는 1과 同等하다. 傾斜度가 增加하면 流出時는 碎破時 一定한 波高에 대하여 傾斜面 上部로 移動된다. (Fig.9)

나. 中心鋼土材料의 透水性의 影響

中心鋼土材料의 透水性에 대한 影響은

$$F_{\text{core}} = F_{\text{dynamic}} + F_{\text{static}} \dots \dots \dots (6)$$



		WAVE HEIGHT CAUSING FAILURE CM.				
	Elevation of lowermost end of int. layer	±0	-5	-7.5	-10	-27.5
	Perforated steel pl.					7.5
b	Imperm. steel pl.	8.4	8.2	7.2	8.5	8.0
c	Flexible plastic pl.	7.8	8.0	7.2	4.0	4.1

Fig. 12. Stability Tests with Intermediate Layer between Armor and Sublayer (1 cm=0.39 in.)

여기서 F_{dynamic} 는 無視. 安全性에 대한 透水性의 重要性을 發見하기 위하여 同等한 花崗岩 捨石層 (60 mm)과 같은 濾層(20 mm-30 mm)을 使用하여 實驗하였으며 그러나 三種의 中心鋼土材料 및 木材 스텝과 네런제는 代替案으로서 實驗하였다. Fig. 14는 構造物에 最大波가 上昇할 때 觀測한 水位이다. Hedar(10)는 低靜水頭로 因하여 中心鋼土材의 높은 透水性에 대하여는 相當한 安全性이 增大됨을

알았다. Fig.15(16)은 여러가지 中心鋼土에 대하여

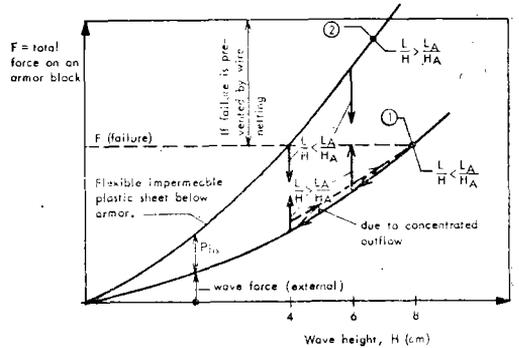


Fig. 13. Distribution of Forces Causing Failure at Maximum Downrush with and without Intermediate Flexible Layer ($\sigma_b=0$) between Armor and Sublayer 1cm=0.39 in.)

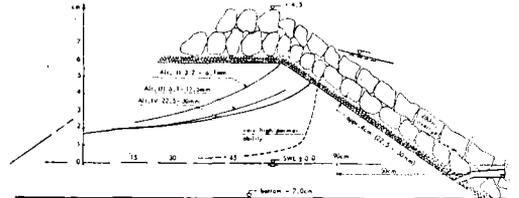


Fig. 14. Water Elevation in Core at Maximum Uprush for Varying Permeability of Core (1 cm=0.39 in.)

Note : Damage is more pronounced and occurs earlier for finer core material (alt.II) than with a more coarse core, mainly for higher damage ratios, k=coefficient of permeability Armor was 6 cm in diameter.

Note: Damage is more pronounced and occurs earlier for finer core material (alt. II) than with a more coarse core, mainly for higher damage ratios, k = coefficient of permeability. Armor was 6 cm in diameter.

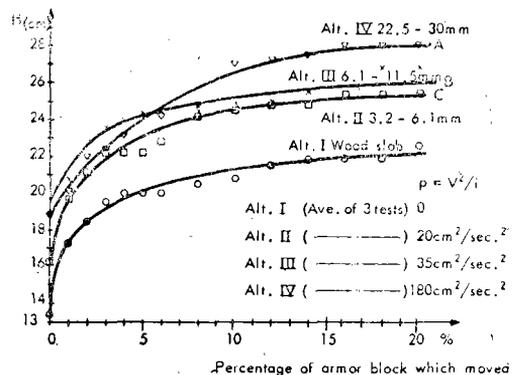


Fig. 15. Damage Ratio versus Wave Height for Different Core Material (1 cm=0.39 in.)

波高에 의한 崩潰率을 프룻트한 것이다. 崩潰는 粗大한 中心鋼土보다 細粒으로 된 中心鋼土가 더욱 顯著하며 또한 더 일찍 發生하였다.

5. 摩擦力

Fig.17의 球形體 No. 3 (K=3)은 最上位置의 球

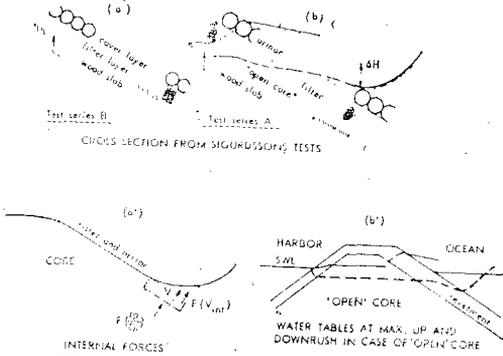
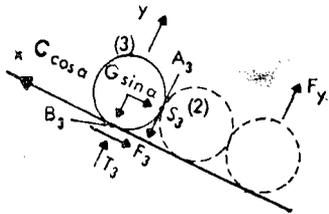


Fig. 16. Importance of Permeability of Core Material on Stability Conditions



Calculation of number of spheres above the affected sphere necessary to prevent sliding between the balls and the base (admit full mobilization of the torque moment.

First calculate the slope angle (abscissa) and the coefficient of friction (μ -ordinate) for stable condition for $K=3$ ($F_3=S_3$)

Fig. 17. Calculation of Number of Spheres

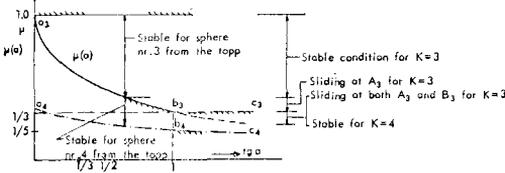


Fig. 18. Number of Balls Necessary to Stabilize Torque Moment versus Slope Characteristics

形體이다.

$$F_3 = S_3 \leq Gf(\alpha) \frac{\mu}{1-\mu} \dots\dots\dots (7)$$

여기서 $f(\alpha) = \min |\sin \alpha|$: 그리고 $S_3 = (1/2)G \cos \alpha$ 3개의 球形體中 影響되는 球形體 위의 單只 3個 球形體로서 安全性에 基因된 粗度(μ)에 대해서 다음 의 限界가 주어진다.

$$\mu \geq \frac{1}{1+2tg\alpha} = \mu(\alpha) \text{ for } 0 < tg\alpha \leq 1 \dots\dots\dots (8)$$

$$\mu > \frac{1}{3} \text{ for } tg\alpha \geq 1 \dots\dots\dots (9)$$

安全性의 條件을 Fig.18 (曲線 a_3, b_3, c_3)과 같이 圖示하였다.

Table-1. Results of Friction Tests

Intermediate layer (1)	Angle of repose, ϕ , in degrees (2)	Contact zone (3)	$\phi(\gamma)$ (4)	$\phi = \phi(\sigma_p)$ (5)
------------------------	--	------------------	--------------------	-----------------------------

(a) Uneven Surface

Linen sheet	59.5	Stone/linen	+	little more even (-)
Directly on filter	52.7	Stone/stone	0	0
Plastic sheet	43.6	Stone/plastic		more even

(b) Smooth Surface

Wooden plate	37.6	Stone/wood	+	
Perforated metal plate	35.2	Stone/metal	0	

粗度が 작을 경우 安全性에는 더 많은 球形體가 所要된다.

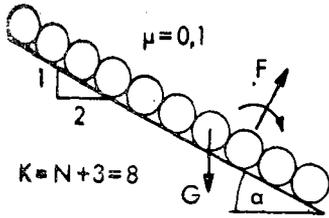
計算는 安全性에 대한 必要條件으로서

$$F_{3+N} = S_{3+N} = \frac{1}{2}G \cos \alpha \frac{1 - (2N+1)\mu}{1 - \mu(-1)^N} \dots\dots\dots (10)$$

$$\mu = \frac{1}{(2N-1) + 2tg\alpha} = \mu(\alpha) \text{ for } 0 < tg\alpha \leq 1 \dots\dots\dots (11)$$

이들의 式은 그 床面外에서 3個의 最上位 球形體 (0.1 및 2)가 回轉하므로써 滑動을 防止하는데 必要한 것을 決定하는 것이다(5). Fig.19에서 例를 들어 콘크리트 球形體의 粗度 $\mu=0.1$ 와 같은 1:2의 콘크리트板에 設置하였다.

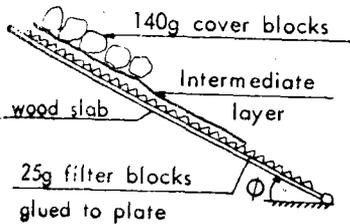
式 11에서는 頂上部부터 露出된 球形體(No.1) 위 의 球形體의 數는 最大外力($F_y = 2G \cos \alpha$)을 底部摩



Consider as example $\mu=0.1$, $\cot\alpha=2$. F_y increases and is maximized for ball No. 8, $F=\text{const}$ for $K>8$.

$$F_{s+N} = \frac{1}{2} G \cos\alpha \frac{1-(2N+1)\mu}{1-\mu(-1)^N}$$

Fig. 19. Calculation on Internal Stability



In test series(16) the angle of repose, for dry conditions, was found for different friction conditions (by means of an intermediate layer) between filter and armor layer. The results are shown in Table 4.

Fig. 20. Cross Section of Model, $\phi_{\max} = \text{Angle of Repose}$

$$\mu = \frac{1}{2N+1} \text{ for } tg\alpha > 1 \dots \dots \dots (12)$$

擦에 의해 抵抗시키는 것이 必要하다. $2N-1+2 \cdot 0.5 \geq 1/0.1 N, >5$. 그러므로 最大安全度는 頂上部부터 球形體 No.0.8에 대하여 얻어지며 崩潰되는 最大力은 理論적으로 球形體가 내려감에 대하여 一定하다 被覆層의 安息角中에 대하여 被覆과 下部基礎層間의 摩擦에 대한 重要性을 明確히 하기 위하여 圖示한 Fig.20과 같이 木材스랩에 필터, 블록을 接着시켜 若干의 乾狀實驗을 하였다. 表 1은 linen, plastic, wooden, 및 多孔性 鐵板 등의 摩擦實驗 結果이다.

實驗結果의 結論으로 安息角은 摩擦(μ)이 增大하고 下部基礎層이 고르지 (平坦) $\phi(\sigma_p)$ 못할수록 增大된다.

이것은 Miller 및 Byrne에 의한 實驗으로서 波浪의 影響에도 適用된다. 그들은 粗雜한 河床에서 單一粒徑의 平均安息角에 대하여 다음과 같이 表現

하고 있다.

$$\bar{\phi} = f\left(\alpha, \frac{D}{\bar{K}}\right), \beta \dots \dots \dots (13)$$

여기서 $\bar{\phi}$ = 平均安息角

α = 河床과 粒徑形과 結合된 페라미터

D/\bar{K} = 單一粒子の 直徑比率

D = 河床粒子の 平均直徑

\bar{K} 및 β = 河床粒子の 分類 結果와 結合된 페라미터

實驗結果는 表 2 및 Fig.21에 表示하였으며 球形體에 包含한 여러가지에 대한 D/\bar{K} 의 函數로서 ϕ 는 모든 경우에

$$\phi = a\left(\frac{D}{\bar{K}}\right)^{-0.8} \dots \dots \dots (14)$$

a 의 값은 球形體 50에 대하여 破壞한 石英岩 70가지이다. Fig.21은 美國工兵團에서 捨石被覆材에 隨伴한 層에 대하여 一般적으로 使用하는 것은 橫座標로 더 부춧다. (13). 그것은 重量을 粒子直徑比率로 換算한 것을 表3에서 參照하였다.

$W/20$ 보다 $W/10$ 을 下部基礎層으로서 使用하여 滑動에 대한 傾斜安全性의 增加는 $1.4/1.2=1.15$ 임을 留意하여야 한다.

W 와 $W/10$ 사이의 $W/2$ 層을 使用하므로써 安全性의 增加는 $1.75/1.4=1.25$ 이다. 球形體에 關係는 特殊한 狀態가 存在하는 것으로 보인다. Ref 5에서 記述한 바와 같이 $tg\phi$ (20)과 上部球形體와 下部基礎層 사이의 接觸點 間의 關係는 相互垂直으로서 2個 方向으로 거의 直線型이다. Fig. 22는 接觸面의 數(A)가 粒子直徑의 函數 $A = \bar{K}/2.56$ 로서 附與된 것이다.

다음의 2種의 關係式을 發見하였다.

$$tg\phi = \frac{K}{2.61} \text{ for } \frac{D}{K} < 1; \bar{K} = K \dots \dots \dots (15)$$

$$tg\phi = \frac{1}{0.3+0.59 \frac{D}{\bar{K}}} \text{ for } \frac{D}{K} > 1; \bar{K} = \bar{K} \dots \dots \dots (16)$$

$D/K > 1$ 의 狀態는 捨石防波堤에 대한 實用的인 경우이다. Fig.23은 實用的인 捨石堤에 있어 W 의 比率에 대한 特別한 關係로서 $tg\phi$ 와 D/K 間의 比率을 나타 낸 것이다.

表 4는 表 3에 對應한 球形體에 限해서 關係된다 下部基礎層으로서 $W/20$ 代身 $W/10$ 을 使用하므로써 滑動에 대한 傾斜安全度의 增加는 $0.7/0.6 \sim 1.15$ 이다.

Table-2. Angle of Repose of Individual Spheres on Fixed Bed of Uniformly Sized Spheres of Diameter, $K=0.1$ in. (0.25 mm)

Data (1)	Particle Size, D , in inches (millimeters)						
	0.035 (0.088) (2)	0.05 (0.125) (3)	0.07 (0.175) (4)	0.1 (0.250) (5)	1.4 (0.350) (6)	2.0 (0.500) (7)	2.8 (0.710) (8)
ϕ , in degrees	72.4	61.1	52.5	48.6	38.5	35.7	29.0
σ_ϕ , in degrees	16.9	52.5	14.0	18.5	19.0	15.8	9.7
$\tan\phi$	3.152	1.804	1.303	1.134	0.795	0.719	0.554
D/\bar{K}	0.352	0.500	0.700	1.000	1.400	2.000	3.000

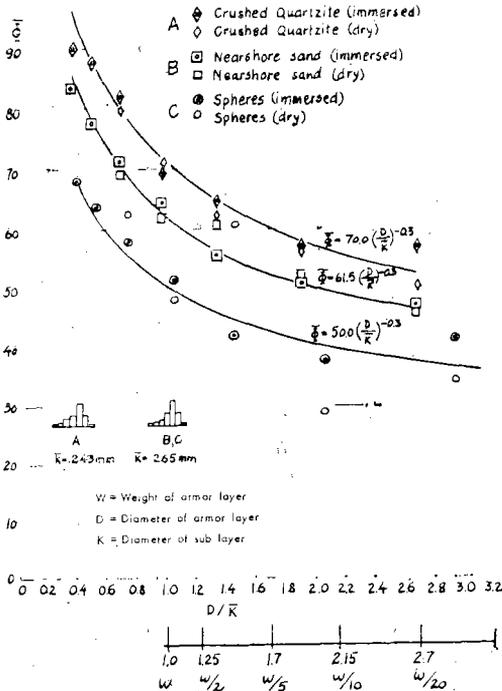


Fig. 21. ϕ as Function of D/\bar{K} Ratio (1 mm=0.04 in.)

Table-3. Popular Weight Ratios in Rubble Mounds and Corresponding Ratios between Diameters in Armor and Sublayers, ϕ and $tg\phi$ (Approximately), for Crushed Quartzite

Weight ratios (1)	Diameter ratios (2)	ϕ , in degrees (3)	$tg\phi$ (4)
W to W	1	70	2.75
W to W/2	1.25	65	2.1
W to W/10	2.15	55	1.4
W to W/20	2.7	50	1.2
W/2 to W/10	1.7	60	1.75
W/2 to W/20	2.15	55	1.4

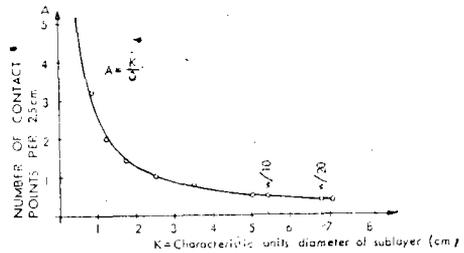


Fig. 22. Number of Contact Points between Stones versus Grain Diameter (1 cm = 0.39 in.)

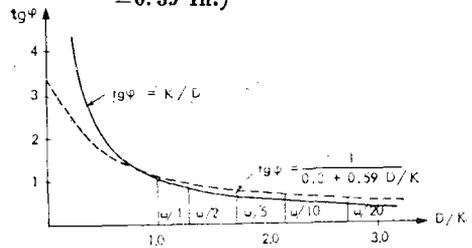


Fig. 23. Relation between $tg\phi$ and D/\bar{K}

W와 W/10층 사이에 W/2층을 사용하면 安全度の 向上은 0.8/0.7~1.15이다.

表 4에서는 W/(W/10)에 대하여는 單只 0.7 인 데도 (表 4의 項參照) W/W에 대하여는 $tg\phi$ 가 1.1 입에 留意하여야 한다.

때로는 W/W10 층간에 W/2층을 裝置하는 것이 推薦되고 있다. 그러나 問題는 다음 2個의 條件을 直接比較하여야 한다.

- (1) 滑動으로 因하여 失敗하는 乾狀條件 即 安定度 f (安息角)을 말함.
- (2) 崩潰가 대개 揚壓力이나 顛覆力에 의한 곳은 破浪作用이 濕潤條件, 또는 큰 崩潰가 되는 比率에 到達할 때 까지는 比탈 밑의 滑動은 생기지 않을 두가지 경우이다.

이러한 見地에서 安全性的의 어려운 增加는 乾狀條件에 대하여 波力과 安息角(ϕ)下에서 安全性的에 대

한 關係를 表示한 表 5에서 보는 바와 같이 下部 基礎層이 크르지 못할 수록 增加하며 이로 基因한 安全도가 비슷하게 增加한다는 것이 顯著하다.

Table-4. Popular Weight Ratios in Rubble Mounds and Corresponding Ratios between Diameters in Armor and Sublayer, ϕ , for Spheres According to Figs. 21 and 23

Weight ratios (1)	$tg\phi$	
	Fig.21 (2)	Fig.23 (3)
W to W	1.2(50) ^a	1.1(48)
W to W/2	1.05(47)	0.95(43)
W to W/10	0.85(40)	0.7(35)
W to W/20	0.7(36)	0.6(31)
W/2 to W/10	0.9(38)	0.8(39)
W/2 to W/20	0.85(40)	0.7(35)

^aValues in parentheses are ϕ .

Table-5. Relationship between Wave Height and Angle of Repose

Data (1)	Failure wave height for spheres, in inches (millimeters) (2)	Angle of repose for quarry stone, in degrees (3)
Perforated steel plate	$H_f = 3.6$ (90)	$\phi = 35.2$
Plastic sheet	$H_f = 3.8$ (95)	$\phi = 43.6$
Directly on sublayer	$H_f = 4.0$ (100)	$\phi = 59.5$

6. 傾斜型態

Ref. 5에서 詳細히 說明한 바와 같이 波浪 ta 의 uprush 期間의 比率이 波浪의 周期 T 는 海岸에서 흐름의 條件을 特徵 지을수 있다. ta/T 와 같이 分明히 된 樣相의 差異로서 波高 및 海岸條件은 그

水中下에서 同樣한 特徵을 보이는 安定된 防破堤 型態의 發展과 더불어 海岸模型法則과 海岸의 捨石 構造物의 斷面 (25) 또는 Noda (22)에 의하여 部分의 使用되는 貯水池(24)에서 一部分은 著者에 의한 方法과 海岸 模型 法則의 發展으로서 特徵的인 安定된 海岸型態를 比較하는 것이 試圖되었다

特徵있는 흐름型態에 따라 各其 表面波(surge), 淺海波(transition) 海岸波(surf)로 區別할 수 있다.

類似한 均衡斷面을 ref. 5에 記述하였다.

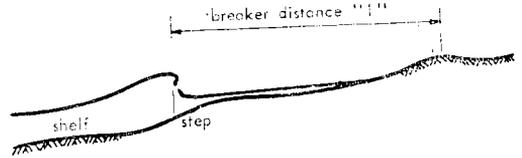


Fig. 24. Typical Step Profile

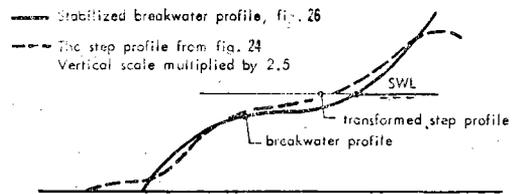


Fig. 25. Breakwater Profile (Fig.26) and Transformed Step Profile from Fig.24

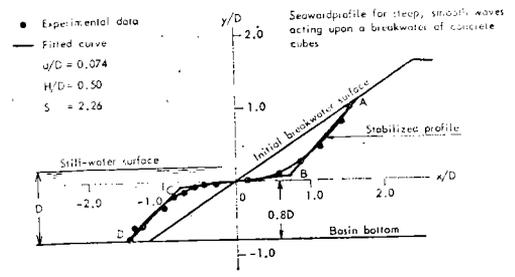


Fig. 26. Stabilized Breakwater Profile

適當한 模型의 尺度는 安定된 海岸型態 即 階段型(Fig.24-step-type)에서 無限한 波浪作用으로 發達된 捨石堤斷面(Fig.25)으로 變形되는 것이 可能하다는 結果이다. 그러한 階段型은 S型으로 自然히 된다.

變形된 形狀은 粒子 直徑比가 減少됨에 따라 相當히 減少된다($n_D = D_m/D_p$).

7. 波의 同調(均衡) 現象

上述한 바와 같이 特殊하게 危險한 狀態가 생기는 것은 萬若 波의 同調現象이 周期 및 "downrush period" 사이에 생긴다. downrush가 低位置이며

破潰 및 潛入하는 碎破는 最大 波力이 傾斜面에 對해서 直角이 되는 地點이거나 近接한 位置에서 同時이거나 反覆되면서 생긴다. 同時에 內部側으로부터의 靜水壓力은 最大로 된다.

이 現象은 實用 經驗으로서 即 和蘭 英國의 리벳트먼트—revetment나 노루웨이 防波堤에서도 잘 알려져 있다. 노루웨이의 實驗結果에 의한 1:3 傾斜의 非透水性에 대하여 觀測한 힘(force)에서 (1)과 라미타;

$$\xi = (tg\alpha / \sqrt{H/L_0} \sim tg\alpha T / \sqrt{H},$$

여기서 T=周期

H=構造物 앞에서의 波高

α =傾斜角

은 uprush, downrush 및 平滑한 傾斜面에서의 碎波를 解説하는데 有用하다.

破潰潛入防波堤의 가장 낮은 downrush는 값이 $2 < \xi < 3$ 또는 약 2.5일때 생긴다. 潛入이 最大이고 揚壓力이 最少되는 壓力은 위와 같은 ξ 값에서 생긴다. 이것은 여러가지 普遍的인 傾斜角에 對해서 事實로 適用되고 있다.

Fig.27은 美國工兵團의 海岸技術研究 센터에서 安定度 實驗에 대한 資料를 參考한 것이다.

周期 2.8秒-11.3秒圍範, 傾斜 1:1.5~1:5.0 그리고 破潰에 대한 波高는 0.6~1.2 m였다.

橫座標는 ξ 이고 縱座標 “Zero-damage” Number 는 安全度이다.

$$N_{ZD} = \frac{H_{ZD}}{\left(\frac{W}{r_f}\right)^{1/3} (S_r - 1)} \dots\dots\dots(17)$$

여기서 H_{ZD} =構造物 앞에서의 Zero-damage 波高

W=블록의 무게

r_f =물의 단위 무게

r_r =돌의 단위 무게

$S_r = r_r / r_f$.

實際的뿐만 아니라 科學的으로 더 믿을 수 있는 더욱 낮은 合理的인 設計節次는;

첫째; 技術 및 經濟的見地에서 魅力的인 設計가 되어야 하며

둘째; 設置場所에서 極端的인 경우(11)의 解析과 既述한 Refs, 23 및 27에서 連續된 波高間의 相互關係에 對하여 特別한 關聯으로서 大體的인 正常波의 傾向으로부터 實際波浪 스펙트라의 數値를 調査하여야 한다.

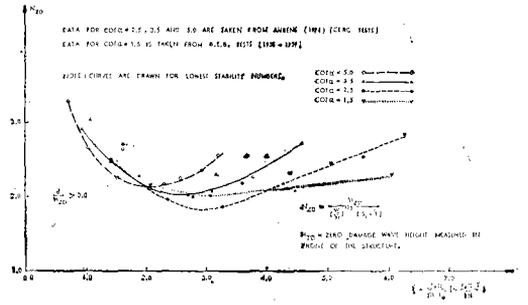


Fig. 27. Zero Damage Stability Number Versus $\xi = tg\alpha / \sqrt{H/L_0}$.

8. 結 論

要 約

設計原則은 다음의 것이 包含된다.

1. downrush 流速은 될 수 있는 限 적어야 하며, downrush 斷面의 急한 傾斜는 避하여야 한다. 그러므로 uprush는 留保시키거나 또는 減少시키야 한다.

2. 높은 이너시아(inertia-慣性) 및 吸出力(drag forces)을 避하는 必要性은 “例外的으로 빠져 나오는 要素를 避하는 것”

3. 波浪의 同調(均衡)現象(resonance) 또는 “downrush period” 사이의 同調現象에 對한 設計를 避할 것.

$\xi = tg\alpha / \sqrt{H/L_0}$ 의 값은 uprush, 頂上의 높이 및 downrush 뿐만 아니라, 그로서 무거운 被覆石을 下部傾斜面域에 對하여도 被覆石 安定度에 대한 決定要素이다.

4. 透水性이 클수록 靜水壓力의 內部 上昇은 적어진다.

5. 被覆石 相互間과 이들 블록과 下部 基礎層間的 摩擦은 重要하다. 被覆石層의 長이가 重要度를 더하게 된다.

6. 破壞力이 最大로 되는 곳의 傾斜는 最大로 緩慢하게 하여야 한다. 이것은 S型態를 主張하는 것이며 特別히 比較的인 潮差가 작은 條件에 對하여 이다 被覆石의 傾斜에 對한 設計 및 施工에 對하여 3個 領域으로 區分하는 것이 實用的이며 經濟的으로 보인다.

이의 各其 特徵的인 블록 性質은 Fig.28에 圖示

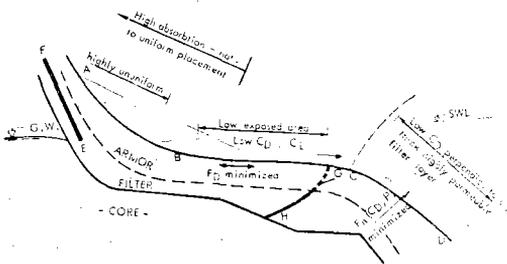
하였다. “플랫드폼—platform” BC는 比較的 緩한 기울기로서 即 1:3이다. Run-up가 C點에서 潛入하는 波浪은 渦流와 靜水盤 B.C에서 에너지의 吸收로서 減少되는 것이다.

急傾斜 C.D는 碎破되는 捨石堤의 비탈끝 部分과는 分離되며 그러므로 碎破의 끌기 (tow) 사이에 相互作用이 이루어진다. 또한 安全度에 대해서 普遍的으로 가장 危險한 波浪이 退進하는 가장 低位部 높이에서 最大가 되는 힘과 이들 破壞力의 衝擊을 적게하고 減少시키는 相互作用을 하게 된다.

透水性이 낮은 HG層은 流出水를 外力과 碎破되는 밑에서 主要 吸引力이 最大로 되는 곳의 碎破點에서 集中되는 것을 防止한다.

또 다른 低透水性層인 FE는 E點 以上の 流入水를 防止하며 波浪이 退進하는 동안에 築造物內의 靜水壓의 增強을 減少시킨다.

BC 領域에서 블록의 吸出力 係數는 傾斜에 平行되며



The ‘false’ beach, BC, evolves a new breaking point at C, which reduces run up plunging waves and out of phase damping ($t_a/T/2$).

The impervious layer, FE, prevents inflow above point E which reduces the build up of hydrostatic pressure in the mound. The impermeable layer, GH, prevents backwash-outflow to be concentrated at the breaking point, where the external forces are maximized.

The Steep slope, CD, makes the backwash incipient breaker interaction less violent and further separates backwash the retreating velocity field in the toe of the breaking wave.

The breakwater slope is divided into three zones, each with its characteristic block-properties. This results in more evenly exposed structures which increases safety against failure. In all cases however, some flexible interlocking effects is very significant.

Fig. 28. Optimization of Breakwater Properties

—人造海岸, BC, 領域은 C點에서 碎破가 進展되며 그것은 runup (潛入波 및 段階의 吸入($t_a/T/2$))를 中 減少시킨다.

—非透水性層 FE는 築造物의 靜水壓을 增加시키는 것을 減少시키며 E點 위의 流入水를 防止한다. 非透水性層 GH는 外力이 最大로 되는 곳, 碎破 地點에 集中되어지는 背面 外出水를 防止한다.

—急傾斜面 CD는 背面洗掘—初期 碎破相互作用의 激動을 減少시키게되며 더 나아가 碎破되는 비탈끝에 있어 退潮流速으로 부터 背面洗掘을 分離케 한다.

—防破堤의 傾斜, 3個 領域과 各其 그 블록의 特性으로 分割하여 진다. 이것은 崩潰에 대한 安全度가 增加하는 것은 더욱 관관하고 露出된 構造物에 基因된다. 그러나 이 모든 경우는 若干 柔軟한 相互 結合된 結果는 大端한 意義가 있다.

被覆石의 露出面을 될수록 적게 하여야 한다.

CD 領域에서는 傾斜면에 垂直인 塊石블록의 吸出摩擦係數는 滿水位 水壓과 集中된 流出水로 因하여 最少限으로 하여야 한다.

AB의 높은 部分의 傾斜는 高流速에 露出되지 않으므로 比較的 粗雜하여도 될 것이다. 粗雜한 面部位는 uprush를 減少시키고 downrush 流速을 低下시킨다.

捨石堤가 “完全”할 때는 S-型으로 發展된다는 것은 오래前 부터 알려져 왔다. 새로운 아라비아海의 Mangalore, India에서는 部分的으로 土質條件과 블록이 重量體이고 取扱하는 機械를 避하기 위하여 S-型으로 築造되었다. 防破堤가 英國의 Plymouth, 佛蘭西의 Cherbourg은 150年—200年前에 築造되었으며 S-型 (5)이다.

이 設計는 勿論 限定된 潮水作用의 바다에 最善이며 現段階에서의 設計의 詳細한 것은 模型實驗에 의하여 決定하는 것이 最善이다. 非透水性板을 布設하는 實際의인 樣相은 두더운 나이론으로 할 수 있는 上部板은 施工業者도 別 問題가 없는 것으로 생각되어 왔다. 低位部板은 露出된 海岸에서 若干의 어려움이 內包되고 있다.

그러한 경우 시멘트 注入 또는 아스팔트 모르타르로 板子를 代替할 수 있을 것이다.

1974년에 Pueroto의 Rico Palmas Del Mar에서 築造한 防破堤는 上述한 設計原則을 適用하므로써 相當한 節約이 되었다.