

# フィルダム余裕高の実用計算図表

資 料

高 瀬 国 雄\*

## 1. 従来の方とそ問題点

フィルダム(アースダムとロックフィルダムの総称)の欠壊,または事故の原因の中で,余水吐(または余裕高)の能力不足がきわめて高い比率を占めていることは周知のとおりである。たとえば,アメリカ<sup>1)</sup>では102ダムの欠壊原因のうち34.5%,日本<sup>2)</sup>の老朽アースダム27751例の16.4%が,これに該当している。

それほど重要なものであるにもかかわらず,余裕高に関する基準は,日本でも世界でも,きわめて大ざっぱなものしかなく,フィルダム設計における他の分野(たとえば最大洪水流量の算定法とか,安定計算の方法など)の進歩にくらべて,不つりあいに遅れているとの感をぬぐいえない。すなわち,従来の方を要約すると,つぎようになる。

### (1) 日本における基準<sup>3)</sup>

異常洪水流量を考慮した最高貯水面上,風による半波高に打上げ高を考えた高さ(すなわち,スチブソン公式で算出した値の $1/2 \times 1.5 = 3/4$ 倍),および0.5mを加えたもの。または式(1)で算出した値とくらべて大きい方をとる。

$$h = 0.03 H' + \alpha (m) \dots\dots\dots (1)$$

ここに  $h$ : 設計洪水面上の余裕高

$H'$ : 基礎地盤から設計洪水面までの高さ

$\alpha$ : ロックフィルダムするとき=1.0m

アースダムするとき=1.5m

### (2) 世界における基準<sup>4)</sup>

異常洪水位に波高の1.5倍,および安全高を加える。この安全高は,ダムの高さ,貯水池規模,洪水流量計算の精度,および慣習を考慮して,0.6~3.0mの範囲にとる。

### (3) アメリカ開拓局の基準<sup>5)</sup>

対岸距離8km以内,貯水量1200万 $m^3$ 以上(アメリカでの中~大規模アースダムと考えられる)のダムについて,余水吐クレストまたはゲートの上端から,堤頂までの余裕高はつぎのように決める。

#### a) ゲート余水吐の場合

堤高70m以上のとき……………余裕高3.0m以上

堤高70m以下のとき……………余裕高2.4m以上

#### b) 自然越流余水吐の場合

余裕高異常洪水位+1.8m以上

もちろん,フィルダムの余裕高の決め方というものがそう簡単に割切れるものでないことは了解できる。しかし,できるところから少しずつでも合理的なものに改善してゆきたいということを思い立って,ここに若干の考察を進め,一つの計算図表を提示してみた。

上記の日本の基準を,私達もまた昭和31年以来,10年間にわたって使ってきたのであるが,その問題点を思われるところは,つぎのような点であった。

(1) スチブソン式は,対岸距離のみによって波高が決まるようになっているが,波高はこのほかに,風速という重要な要素があり,また打上げ高の大小については,ダムの斜面勾配,斜面保護材料の粗度などが大きく影響をおよぼすはずである。またスチブソン式では,対岸距離が0mのときでも,0.75mもの波高が起きることになっており,これは明らかに不合理である。また対岸距離が10kmぐらいになっても,1.35mの波高しか起きないことになっているが,これまた1.5m以上の波高がいくつか観測されている事実と反する。

(2)  $0.03 H' + \alpha$ の式は,そもそも昭和31年当時に存在していた既存の大ダムの実績から,逆に式を導き出したものであるから, $H'$ の範囲はせいぜい15~50mぐらいの範囲にしか適用できない宿命をもっている。わが国に現存する農業用アースダム約27万個のうち,そ

\* 正会員 農林省農地局設計官

の99%以上が堤高15m以下の低ダムであるが、これらに対しては過大な値を与える結果となっている。また堤高50mを越える高ダムが続々と建設されつつある今日としては、もっと適用範囲の広い基準が望まれることは当然の成りゆきであろう。

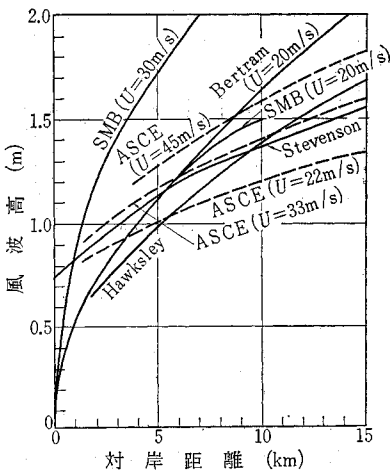
## 2. 波高計算式のいろいろ

余裕高の計算の中で、もっとも大きな要素となるのはやはり波高であろう。その波高は、大別して風による波高と、地震による波高に分けられる。地震による波高の計算式は各種のものがあるが、その中で最も大きな値を与える佐藤清一氏の公式によって算出した値でさえも、風による波高とくらべて小さいのが普通である(水平震度0.15g, 周期1秒, 貯水深60~100mのときに, 波高=0.6~0.7m程度である)。また, 地震と強風が同時に起こる確率はきわめて小さいので, 余裕高計算には, 周波高のみを考え, 地震波高は無視することとする。

さて, ステブソン式に風速の要素を入れたものに, モリター式がある。しかし, 前項で述べたように, 対岸距離が小さい場合には過大値を与える欠点があるので, 適当ではない。

アメリカ土木学会(ASCE)<sup>6)</sup>で1948年に過去の経験式を集約して作成した。対岸距離・風速・波高の関係を, グラフにプロットすると, 図-1のようになる。ここでは風速は22~33m/secが適当であろうとしているので, その結果はほとんどステブソン式と一致している。

図-1 風波高計算図表のいろいろ



つぎにアメリカ海軍水路部と陸軍土木部で, 比較的小規模な貯水池で使用しているBertram法<sup>7)</sup>がある。これは, 1.2m以下の波高部分については, 実績とよく合っており, 1.2m以上になると, 計算よりも実績がやや大きく出る傾向があるといわれている。また今までに観測された100個のダムにおいて, 最大波高は2.4mであったという<sup>8)</sup>。この式は, 対岸距離・風速・波高の関係のほか, 風の吹送時間の要素も入っていて, きわめて

合理的と思われるが, フィルダムの波高計算の要素として必要な斜面勾配, 斜面保護材料との関連が入っていないので, やはりわれわれの目的には不十分である。

斜面勾配と斜面保護材料の粗度の要素を, 波高に関連して考えたものには, Savilleの方法<sup>9)</sup>がある。彼は波高と波長の比率を用いて, 波の打上げ高さを算出することを試みたのであるが, SMB法<sup>9)</sup>をこれに組み合わせれば, 波高と波長とをパラメーターとして, フィルダムの打上げ高が計算できることに思い当たった。

SMB法は深水波の代表的計算法として広く知られている方法であり, 貯水池における風波高も深水波と考えられるので, SMB法はそれ自身としても上述したいずれの波高計算式よりも適しているといえる。試みに図-1にプロットしてみたところ, 風速=20mにおいては, 最も合理的な値を与えるとしてされているBertram式と, ほとんど一致した曲線をえがいている。したがって以下, SMB法によりまず波高と波長を算出し, つぎに, Saville法によって, 打上げ高を計算する図表を作成することとしよう。

## 3. SMB法による風波高の算出

普通, われわれが貯水池において使用する範囲は対岸距離にして100m~10km, 風速にして10~50m/secをとれば十分である。この範囲に適用されるSMB式の条件は, つぎのようになる。

$$\frac{gH}{U^2} = 0.003 \left( \frac{gF}{U^2} \right)^{0.45} \quad \text{すなわち} \\ H = 0.00086 U^{1.1} F^{0.45} \dots\dots\dots(2)$$

$$\frac{gT}{2\pi U} = 0.073 \left( \frac{gF}{U^2} \right)^{0.29} \quad L = \frac{gT^2}{2\pi} \quad \text{すなわち} \\ L = 0.011 U^{0.84} F^{0.58} \dots\dots\dots(3)$$

ここに H: 波高 (有義波)  
T: 周期  
U: 風速 (10分間平均)  
F: 対岸距離  
L: 波長

この式(2),(3)を図表化したのが, 図-2である。

## 4. Saville法による打上げ高の算出

図-2から求めた対岸距離(F), 有義波高(H), 波長(L)から, 波のスチープネスH/Lを求める。つぎにSavilleの図表(図-3)からH/L, 斜面勾配, 斜面保護材料がわかれば, R/Hを求めることができる(R=打上げ高を含んだ波高)。この計算経過を示したのが表-1である。

表-1 の計算においては、対岸距離(100 m~10 km)、風速(20 m, 30 m)、ダムの斜面勾配(1.5 割、2.0 割、

2.5 割、3.0 割)、斜面保護材料(張石、捨石)の範囲を取り扱った。これを図表化したのが 図-4 であって、日本のフィルダムについてのほとんどの場合に適用できるはずである。

図-2 SMB 法による有義波高と波長の算出図表

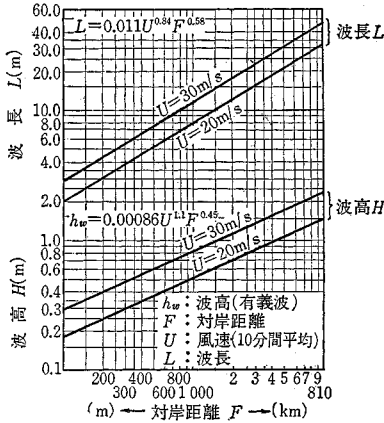
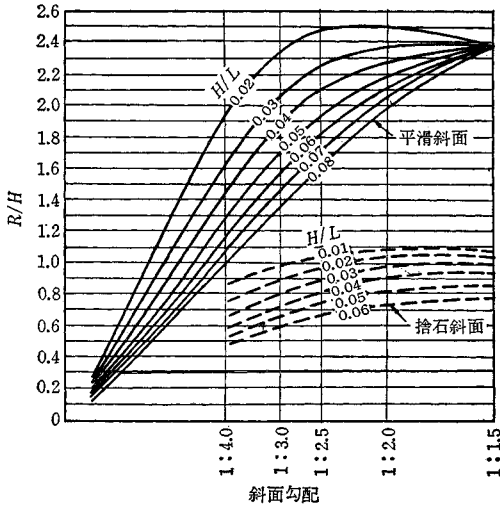


図-3 Savill による打上げ波高計算図表



### 5. 諸要素のとり方

さて、ここで問題は、それぞれの要素をどのように取るかである。この取り方を間違えれば、せっかくここまでできたのが水のあわとなる。主として前記 Saville の論文<sup>9)</sup>を中心に、最近の参考文献を参照<sup>4), 10)</sup>しつつ、つぎのようにとるのが妥当と思われる。

#### (1) 対岸距離 (F)

対岸距離とは、その上を風が吹いて、波浪を起こすことのできる自由水面距離をいう。したがって、本来ならダムから最高風速の方向に測った直線距離(図-5 (a)の  $F'$  または  $F''$ ) を用いれば十分なわけであるが、風

図-4 打上げ高を含む波浪高の計算図表

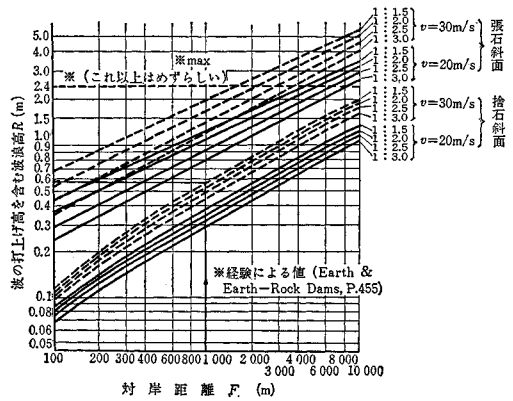


表-1 SMB, Saville 両法を組み合わせたの計算経過表

対岸距離 (F)m	風速 (U) 20 m							風速 (U) 30 m								
	200	500	1000	2000	3000	4000	10000	200	500	1000	2000	3000	4000	10000		
有義波高 (H)m	0.25	0.38	0.52	0.71	0.86	0.97	1.48	0.39	0.59	0.80	1.11	1.31	1.50	2.30		
波長 (L)m	3.00	5.30	8.00	12.00	15.30	18.40	31.80	4.40	7.80	8.80	17.70	22.50	26.80	46.50		
波のステープネス $H_w/L$	0.083	0.072	0.065	0.059	0.056	0.053	0.046	0.089	0.076	0.068	0.068	0.058	0.056	0.050		
張石斜面	1:15	$R/H_w$	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	
		$R$	0.60	0.91	1.25	1.70	2.06	2.33	3.55	0.94	1.41	1.92	2.66	3.15	3.60	5.52
	1:20	$R/H_w$	1.98	2.07	2.10	2.14	2.15	2.18	2.23	1.95	2.03	2.08	2.11	2.15	2.16	2.20
		$R$	0.50	0.79	1.09	1.52	1.85	2.11	3.30	0.76	1.20	1.67	2.34	2.82	3.24	5.06
1:25	$R/H_w$	1.61	1.71	1.79	1.87	1.89	1.90	2.02	1.56	1.67	1.76	1.81	1.85	1.89	1.92	
	$R$	0.40	0.65	0.93	1.33	1.62	1.84	2.99	0.61	0.98	1.41	2.01	2.42	2.84	4.42	
1:30	$R/H_w$	1.36	1.47	1.54	1.61	1.65	1.68	1.82	1.31	1.42	1.51	1.57	1.62	1.65	1.75	
	$R$	0.34	0.56	0.80	1.14	1.42	1.63	2.70	0.51	0.83	1.21	1.74	2.12	2.48	4.03	
捨石斜面	1:15	$R/H_w$	0.58	0.68	0.72	0.79	0.82	0.83	0.90	0.51	0.65	0.70	0.76	0.80	0.82	0.86
		$R$	0.18	0.26	0.37	0.56	0.71	0.81	1.33	0.20	0.38	0.56	0.84	1.05	1.23	1.98
	1:20	$R/H_w$	0.56	0.64	0.69	0.74	0.77	0.78	0.86	0.50	0.61	0.67	0.71	0.75	0.77	0.82
		$R$	0.14	0.24	0.36	0.53	0.66	0.75	1.27	0.19	0.36	0.54	0.78	0.98	1.15	1.89
1:25	$R/H_w$	0.50	0.58	0.65	0.68	0.71	0.72	0.78	0.48	0.57	0.62	0.66	0.69	0.70	0.75	
	$R$	0.13	0.22	0.34	0.48	0.61	0.70	1.15	0.19	0.34	0.50	0.73	0.90	1.05	1.73	
1:30	$R/H_w$	0.46	0.53	0.58	0.62	0.65	0.65	0.70	0.42	0.51	0.59	0.60	0.62	0.64	0.68	
	$R$	0.12	0.20	0.30	0.44	0.56	0.63	1.04	0.16	0.30	0.47	0.60	0.81	0.96	1.57	

R; 波のはいり高 (m)

向のデータは少ないので、ここではダムから「ほぼ直線」距離にして、最大となる対岸距離を採用することとする。「ほぼ直線」としたのは、図-5(b)のように、多少曲っていても、波の伝わるコースとしては  $F'$  よりも  $F$  を取る方が合理的な場合もあるからである。この曲線を、どの角度まで許すかは、設計者の判断の問題である。途中で島があるときには、 $F$  は図-5(c)のように小さくなる。

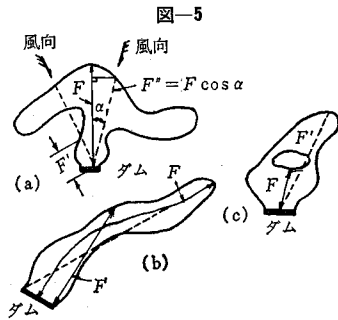
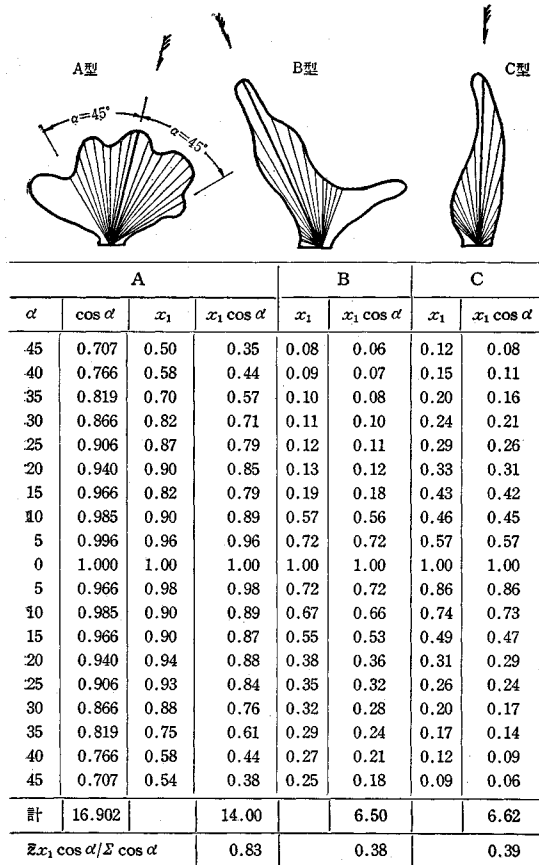


図-5

また対岸距離が同じでも、貯水池の長さにくらべて幅がせまい場合には、両側の地形に制約されて、有効距離は小さくなる。Saville<sup>9)</sup> は、ダムを中心として最大対岸距離(風向の方向)線の両側それぞれ 45° の範囲を適当に分割し、それらが風向線に投影する距離と、その角度の cos 値との積から、有効対岸距離を算出する方法を提案している。図-6 はこの方法によって、各種の形状の

図-6 貯水池形状と有効対岸距離の計算



貯水池における有効対岸距離を計算したものであって、A型では最大対岸距離の 0.83, B, C 型では半分以下となっている。厳密に言えば、対岸距離についてはこのような補正を必要とするのであるが、普通対岸距離が 1 km 以内の場合は波高の計算にそれほど影響しないので最大対岸距離を、そのまま用いることとする。

## (2) 風速 (U)

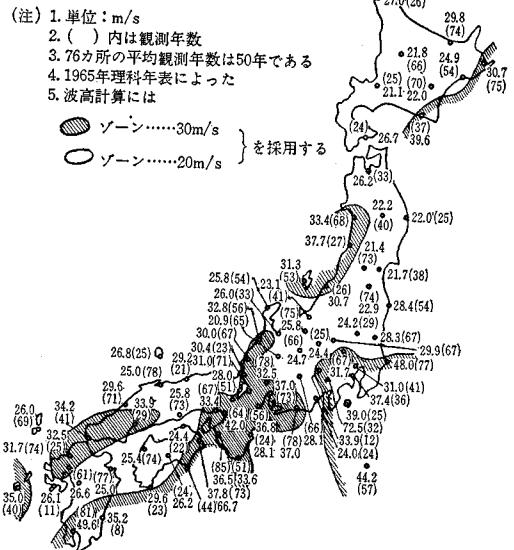
ダム サイトに長期観測資料の少ない場合には、図-7 により強風帯で 30 m/sec, 弱風帯で 20 m/sec をとる。図-7 は全国 76 カ所の最大風速記録(10 分間平均, 観測年数平均 50 年)をもとに、30 m/sec を境界として、日本を強風帯と弱風帯とに二分したものである。瞬間最大風速は、波浪を起こすだけの吹送時間がないので、採用しなかったのは当然としても、ここで 10 分間平均風速よりも、さらに一段と低い値を採用したのは、つぎの理由による。

- a) 多くの場合、ダム サイトは山間にあって、地形植生などの影響を大きく受けて弱まる。
- b) 風向が対岸距離最大の方向と一致しないことが多いので、實際上、対岸距離、風速ともに最大値を取るとは過大にすぎる。

## (3) ダムの斜面粗度

「張石斜面」とは、比較的平滑な斜面をもった張石、コンクリートブロックなどの場合をいう。「捨石斜面」とは、ロックフィルダムのように、波浪が大塊ロックの間げきに吸収されてしまうような場合をいう。図-3 において、4 割勾配、 $H/L=0.06$  の捨石斜面の場合、 $R/H \approx 0.5$  ということは、このような状態での波浪打上

図-7 最大風速図



げ高はほとんどなく、打上げ高を含めた波高は有義波高の半波高にほぼひとしいということを示している。

もちろん、この中間の粗度の場合には、これらの中間の値を採用することができる。Saville<sup>8)</sup>も、たとえば粒径 20~90 cm ぐらいの捨石が、斜面上厚さ 60~90 cm ぐらいに施されている場合には、捨石曲線側から 1/4 ほど張石曲線側に寄った線をとってよいであろうといっている。

#### (4) ダムの斜面勾配

捨石斜面の場合には、勾配によって波の打上げ高はほとんど変化しないが、張石斜面の場合には、急勾配になるほど、波の打上げ高は極端に大きくなり、この傾向は対岸距離が短くなるほど大となる。たとえば  $F=300$  m,  $U=20$  m/sec のときは  $H/L=0.08$  であるから、図-3 において、4 割勾配では  $R=H$  であるのに対し、1.5 割勾配では  $R=2.4H$  にもなることがわかる。したがって捨石斜面では、あまり勾配のことを考える必要はないが、わが国に多い張石斜面では、低ダムの場合ほど、急勾配のときの波の打上げ高は大きくなるので、これらのことは十分に考慮に入れて、堤体断面を設計しなければならない。

### 6. 余裕高の計算

フィルダムの余裕高は、抽象的な言葉でいえば「いかなる悪条件下にあっても、洪水が堤頂を越流することがないように、十分大きくとらなければならない」ということにつきてであろう。

「いかなる悪条件」ということの中には、異常洪水流量時の越流水位、最大風浪時の打上げ波高、ゲート余水吐の場合には、その操作上の危険性を見込んだ余裕、その他の余裕といった要素が含まれるであろう。

異常洪水による増加流量は、越流部から流下させるのをたて前とし、これに対する余裕高の検討にあたっては貯水池の貯留効果をも考慮に入れてよい。この計算は下記の略算によることができる。

設計洪水流量  $Q$  の中で、越流部から流下する分を  $Q_1$  とし、異常洪水による増加流量を  $\alpha Q$  ( $\alpha$  は普通 20% をとる) とすると、設計越流水深  $h$  が  $h+\Delta h$  に増加することによって、 $Q_1+\alpha Q$  を越流させることになる。さらに設計洪水位での貯水面積を  $A$ 、異常洪水の継続時間を  $T$  (標準値=3 時間) とすれば、 $\Delta h$  は式(3)で表わすことができる。

$$\Delta h = \frac{2}{3} \cdot \frac{\alpha Q}{Q_1} \cdot \frac{h}{1+(Ah/QT)} \dots\dots\dots(3)$$

すなわち、余裕高  $H_f$  は、式(4)により算出する。

$$H_f \geq R + \Delta h + h_s + h_t \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 $R$ : 打上げ高を含む波浪高(図-4 から算出

$\Delta h$ : 異常洪水による水位上昇高(式(3)から算出)

$h_s$ : 余水吐タイプによる安全高(ケント式のとき 0.5 m)

$h_t$ : フィルダムとしての安全高(1.0 m)

フィルダムの余裕高の標準値は、過去の多くの経験から 2~3 m 程度とされている。したがって前述の式(4)で計算した結果が、この範囲を大きく逸脱しておれば、その原因をよく考え、若干の調整を必要とする場合もおこりうる。

たとえば、図-4 で、 $F=4$  km, 張石斜面,  $U=30$  m/sec, 斜面勾配 1.5 割のときの打上げ高は 3.8 m ぐらいに出てくるが、現実的には 3 m 以上の波高はほとんど起こりえないという従来の経験からいっても、3.0 m ぐらいにおさええて計算してよいであろう。

しかし、ゲート式ダムで堤高 70 m 以上の場合には、アメリカ開拓局基準にもあるように、3.0 m 以上の余裕高が必要であろう。たとえ、式(4)から算出した結果から、3.0 m 以下となっても、このような場合には技術者の判断によって 3.0 m 以上とすべきであろう。ただし余裕高が 3 m を越す部分については、パラペットを余裕高の一部として使用してもよい。堤高に大きなダムにおいては、余裕高が少し増えることによっても、全堤体積の増加は膨大な量(ダム底面積×余裕高の増し分)に達するので、パラペットの利用は、きわめて経済的とな

図-8 わが国アースダムの余裕高・堤高の関係

ほぼ対応する満水面積	堤高	余裕高+越流水深の平均	件数	今回計算法による算定						旧基準		
				越流水深	余裕高	$R$	$\Delta h$	$h_s$	$h_t$	計	余裕高+越流水深+越流水深	
33ha 以上	30m 以上	(3.0m)	5	1.0	$S=3.0$ $F=1000$	1.2	0.13	1.0	0	2.33	3.33	3.4
16~33	27~30m	(2.7m)	10	0.8	$S=3.0$ $F=800$	1.1	0.1	1.0	0	2.20	3.00	3.1
6~16	24~27m	(2.4m)	10	0.8	$S=2.7$ $F=600$	1.0	0.1	1.0	0	2.10	2.90	3.1
4~6	21~24m	(2.1m)	5	0.6	$S=2.5$ $F=400$	0.9	0.08	1.0	0	1.98	2.58	2.7
2~4	18~21m	(2.0m)	20	0.5	$S=2.5$ $F=300$	0.75	0.07	1.0	0	1.82	2.32	2.6
2ha 以下	18~21m	(1.8m)	30	0.3	$S=2.3$ $F=200$	0.65	0.04	1.0	0	1.69	1.99	2.3

る。しかし、余裕高 3 m 以下のダムにおいては、たとえパラペットを作っても、それは余裕高に含めないのが普通である。

## 7. 既往実例との比較

最後に、このような方法で算出した余裕高が、これまでの実例と大きく違わないかどうかのチェックをやってみた。図-8 は、わが国で昭和 6 年以前に築造された堤高 15 m 以上のアースダム 203 例について、その堤高と余裕高との関係を調査した結果である。この余裕高には、越流水深が含まれているので、今回計算法にもそれぞれの規模の越流水深を推定したものを加えて比較した。また、対岸距離も対応する満水面積から推定したので、若干の誤差は含まれていると思われるが、今回計算法による結果(右から 2 欄目)は、既往実例平均値(左から 3 欄目の( )内数字)よりは 0.2~0.5 m ぐらい大きく出ている。また、現行の日本大ダム会議基準の公式( $0.03 H' + 1.5 m$ )によって算出した値(最右欄)と比較すると、堤高 30 m 以上ではほぼ同じ値となっており、堤高が低くなるにしたがって、今回の方が小さな値が出ている。

## 8. むすび

本稿のとりまとめに当っては、農林省農業土木試験場の出口利裕、中村 充、加藤重一の各技官から、貴重な

示唆をいただいた。また、日本大ダム会議において、設計基準改訂審議中の水理専門委員会(本間 仁委員長)では、ここに提示した打上げ波高計算図表を新設計基準(案)にご採用いただいた。あわせて厚くお礼を申しあげる。

## 参 考 文 献

- 1) Justin: "Earth Dam Project"
- 2) 農林省農地局:「溜池統計」, 昭和 32 年
- 3) 国際大ダム会議日本国内委員会:「ダム設計基準」, 昭和 32 年, 農林省農地局:「土地改良事業計画設計基準アースダム(改訂案)」, 昭和 31 年
- 4) Sherard, etc., "Earth & Earth-Rock Dams", John Wiley & Sons, Inc., 1963
- 5) U.S. Bureau of Reclamation, "Treatise on Dams", 1957
- 6) "Review of Slope Protection Methods", ASCE Proceedings, Vol. 74, 1948
- 7) Bertram, G.E.: "Slope Protection For Earth Dams", Fourth Congress on Large Dams, New Delhi, 1951. Vol. I, p. 209
- 8) Saville, T.: "Freeboard Allowances For Waves in Inland Reservoirs," Proceedings, ASCE, Vol. 88. No. WW 2, 1962
- 9) Suerdrup, H.U. & Munk, W.H.: "Wind, Sea and Swell, Theory of Relations for Forecasting," U.S. Navy, H.O. Pub. No. 601, 1947
- 10) Bretschneider, C.L.: "Revisions in Wave Forecasting, Deep Shallow Water, Proc. 6th Cont. Coast Eng. 158
- 11) U.S. Bureau of Reclamation: "Design of Small Dams," 1960

(1966.7.22・受付)

## 水 理 公 式 集 頒 布

— 昭 和 38 年 増 補 改 訂 版 —

水理公式集の初版が発行されたのは昭和 17 年です。それから 2 回の改訂が行なわれましたが、昭和 38 年に刊行された本書は現在世界中で使用されている代表的な公式をすべてとり入れ、第 1 編 河川、第 2 編 発電水力、第 3 編 上下水道、第 4 編 港湾および海岸の 4 つ大項目に分け、それぞれを 7~11 の中項目を設け詳細に解説した世界でも珍しいユニークな公式集ですので参考書としてぜひご利用下さい。

体 裁 : A 5 判 603 ページ  
定 価 : 1400 円

会員特価 : 1100 円  
送 料 : 150 円

## Civil Engineering in Japan 頒布

Civil Engineering in Japan, 1961	口絵写真 8 ページ・本文 80 ページ・定価 700 円
Civil Engineering in Japan, 1962~3	口絵写真 8 ページ・本文 125 ページ・定価 800 円
Civil Engineering in Japan, 1964	口絵写真 24 ページ・本文 142 ページ・定価 1000 円
Civil Engineering in Japan, 1965	口絵写真 24 ページ・本文 138 ページ・定価 1200 円
Civil Engineering in Japan, 1966	口絵写真 24 ページ・本文 128 ページ・定価 1200 円