

建設省土木研究所 正員 須賀亮三

〃 〃 〃 佐久間襄

〃 〃 〃 山田三郎

1. はじめに

河川河口部、特に高潮区間と呼ばれる範囲の堤防大崎高の決定は、海岸堤防高決定の場合と同様に計画潮位十波の打あげ高十余裕高あるいは計画潮位十越波量が許容以下になる高さを考慮してきめられているようである。太平洋岸に開口している大河川は一般に河口のう配は非常に緩く感潮区は上流までおよび、上述の高潮区間もかなりの距離になるのが通例である(たとえば揖斐川の場合は河口より約8kmの区間)よってこの区間の堤防高を決めるにはこの区間における波高をみつめなければならない。外洋の波は河川河口部から河道内に侵入すると河床地形により変形しながら河道と遡上する。すなわち、水深の不均一による屈折、堤防による反射、堤防の屈曲による回折、河床摩擦による波の減衰(風による波の発達)水深変化による変形、および碎波などによるものとして考えられる。波が河道と遡上する場合、これ等の変形がかなり合い合成されたものとして河道内の波高分布が与えられることになる。河道内の波高分布は、河道地形がごく単純な場合を除いて一般に机上計算によって求めることはできず、平面模型実験によるのと普通としている。以下、河道内への波の遡上実験の一般的手法について通覧しその中の問題点についてふれ、また波浪に関する模型実験では河川の場合ほど一般的ではない全模型実験についてふれる。

2. 河道内の波浪遡上に関する模型実験⁽²⁾

ここぞ河道内の波の遡上に関する模型実験のごく一般的手法について通覧してみる。普通は全のな平面模型を使用し、測定量としては、河道内の断面平均縦断波高分布、堤防への波の打あげ高(あるいは越波量)であろう。最初前者について考える。河口から侵入した波は河道と遡上するにたがい変形し前述のように主な原因は屈折、反射、回折、水深による変形、碎波、河床摩擦による変形(風による波の発達)が主なものとして考えられる。模型河道内で観測される波はこれらが合成された結果と考えられ、問題は実験値と現地における値との対応である。上の変形を最初から項目(屈折、反射、回折、水深、碎波)と河床摩擦との二つにわけて考える。前者は主に河道内の地形によってもたらされる変形であり、模型が現地の地形と相似(全なし)なれば、これ等によってもたらされる模型河道内の波高変形は現地のものとはほぼ相似と見なし得よう。すなわち模型の波高を縮率倍すれば現地のもので得られることになる。一方後者、河床摩擦による変形は一般に模型と現地とは対応していない。例え、模型と現地とで摩擦損失機構が同じと仮定しても、普通、模型における方がその係数が大きく河川模型のように粗度石を置く等のように係数を合わせることは一般には出来ない。よって、現在行なわれている方法は、摩擦による変形は模型と現地とは別々に計算することである。模型内における普通、模型はミルフル床とされる)河床摩擦による波高変形に関しては、細井、畠永、橋

(1) 本は次のような検討と行なっている。すなわち幅 8 m, 長さ 100 m のミルタル水平床水槽を用い、水深 14.7 ~ 15.6, 波高 3 ~ 6 cm, 周期 0.8 ~ 1.5 秒の条件のもとに水路縦断方向の波高分布を求め、境界層と層流と考える導かれた理論式と比較検討し、新しい実験式として次式を提案している。

$$\left(\frac{g L^2}{V^2}\right)^{\frac{1}{4}} \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot \log e\left(\frac{H_1}{H}\right) = \frac{16}{3} \cdot \sqrt{2} (2\pi)^{\frac{3}{4}} \cdot K \cdot \frac{(\tanh \frac{2\pi h}{L})^{\frac{3}{4}}}{\left\{1 + \frac{4\pi h}{L} \cdot \frac{1}{\sin \frac{4\pi h}{L}}\right\} \sinh^2 \frac{2\pi h}{L}} \quad \text{-----}(1)$$

ここに、 g : 重力の加速度, L : 波長, ν : 動粘性係数, H : $x = x_1$ の波高, H_1 : $x = 0$ の波高, h : 水深, K : 実験定数 (この値を実験値から求めた $K = 2.2$ としている)。

一方、現地における河床摩擦の h (あるいは ν による波の発達とも考慮した)、波浪の変形は、Bretschneider の式により計算し得る。この場合問題になるのは式中の摩擦係数 f の値であろう。この値に用いるは Bretschneider はメキシコ湾において $f = 0.053 \sim 0.085$, オキチョビー湖と浅海との波の発達についての観測では $f = 0.01$, また岸は新潟海岸での観測で $f = 0.03 \sim 0.04$, 岩垣、柿沼は秋田海岸での観測で $f = 0.03 \sim 0.09$ という値を得ているが、河道内での波を観測した例は現在のところはないと思われる。また、この Bretschneider の方法は、波の発達、減衰とともに周期が変化することになり、模型実験結果との対比において注意する必要がある。

結局、模型実験により現地河道内の縦断波高分布を求める手順は次の如くである。最初模型内の縦断波高分布の実験値 (H_m) と、模型河道を直線化し水深と適当な区間ごとに平均化した模型 (この仮想模型河道においては波が河道に平行に入射した場合には、反射、屈折、回折による変形は無視でき、もっぱら河床摩擦のみで波高は変化すると考えられる) について式 (1) を用いて縦断波高値 (H_m') と計算し、これ等両者の比 $K = H_m / H_m'$ とその河道の形状係数と名付け、波高の河床摩擦以外の原因によって変化した合成された波高の、いわば河床摩擦のみによって減衰する波高計算値に対する補正係数とも考えられるものを求める。一方現地河川における河床摩擦および ν による縦断波高と Bretschneider の方法を用いて前述の仮想模型河道の如く仮想直線河道なるものについて計算し、(これには反射、屈折、回折等による変化は含まれていないと考える) この波高 (H_p') に先に模型実験から求めた形状係数 K を乗ずることにより現地河道の推算波高 $H_p = K \cdot H_p'$ を求め得る。

また、堤防への波の打あげ高については、模型における打あげ係数 R_m / H_{om} と現地における R_p / H_{op} (ここに R_m, H_{om}, R_p, H_{op} はそれぞれ模型における静水面上の波の打あげ高および断面平均波高の沖波換算値、現地における静水面上の波の打あげ高および断面平均波高の沖波換算値である) は等しい ($R_m / H_{om} = R_p / H_{op}$) と考え、この内 R_m, H_{om}, H_{op} は既知であるから現地打あげ高 R_p を求め得る。

以上からわかるようにこの種の模型実験においては、実験値はもっぱら形状係数 (K) を求めることのみで使用されている。よって現地における波の推算精度は実験の測定値の精度よりもむしろ河床摩擦 (現地の場合は ν による発達も考慮する) のみによる河道内の波の減衰計算の精度に依存していると言えよう。特に現地における河床摩擦および ν による波高変化の推算に関しては前述のように摩擦係数 f の値はもとより、Bretschneider の方法を用いること自体にも一考の余地があり、出来得れば現地における河道内の波浪の実測が望まれるところである。

3. 波浪実験における全模型

流れが卓越する現象に関する模型実験 たとえば一般の河川に関する模型実験、あるいは潮汐等の長周期波を対象にしたものに関する模型実験は普通水平方向、鉛直方向の縮尺を互に異にしたものとする、いわゆる全模型を用いることは可能である。しかし短周期の波(波浪)を対象とする場合は、波形：う配が種々の現象を支配する大きい要素となってくるため一般に全模型は望ましくないとされている。特に堤防への波の打ち上げ高あるいは越波量を測定対象としている実験では、模型と実とを比べると、波形：う配が大きくなるとともに堤防のり：う配が実際よりも急に作られることになり場合によっては危険側の実験を行なうことにもなり得る。しかし、河道と海上する波浪に関する模型実験においては模型内の波高測定精度上(普通、模型河床はモルタルで製作され、全のない正規模型においては水深が小さくなり波の海上に伴う減衰は大きく上流に行くにしたがい測定精度は非常にわるくなる)また、実際問題として、敷地面積あるいは予算上模型縮尺が小さられる場合も多々あり、全模型の可能性の検討が要望される。表-1に鹿島試験所における実施した模型実験の縮尺を示す。

実験名	模型範囲	模型縮尺	現地波浪	模型波浪	潮位	波の入射方向	防風装置	造波装置
荒川	-3.0~7.5 Km 10.5 Km間	水平 1/60 鉛直 1/60	H=3.0~3.6 m T=7.7 sec	H=5~6 cm T=1.0 sec	A.P+5.30 m A.P+4.80 m	S 11° E, S, S 15° W	シートで模型全体を覆う	上流エッジの振子型 (幅20cm, 高さ80cm)
神崎川	0.0~5.0 Km 5.0 Km間	" 1/40	H=2.5~3.0 m T=6.3~8.2 sec	H=6.2~8.7 cm T=1.0~1.3 sec	O.P+5.00 m	S 35° E, S 47° W, S 54° W	"	"
淀川	0.0~10.0 Km 10.0 Km間	" 1/60	H=3.05~3.68 m T=6.63~7.68 sec	H=1.0~8.0 cm T=0.8~1.4 sec	O.P+5.23 m	本工, 本皿 淀川 IV	"	"
大和川	-2.0~4.8 Km 6.8 Km間	" 1/50	H=3.21~3.88 m T=7.23~7.84 sec	H=4.7~6.0 cm T=1.0~1.2 sec	O.P+5.20 m	W, W 20° S, W 40° S	"	"
多摩川	-1.8~4.0 Km 5.8 Km間	" 1/50	H=3.00 m T=6.0~7.0 sec	H=6.0 cm T=0.8~1.0 sec	A.P+3.80 m	河道中心 中心より東15° 中心より東30°	"	"
鶴見川	-2.0~3.0 Km 5.0 Km間	" 1/45	H=3.10 m T=6.30 sec	H=6.0~6.5 cm T=0.9~1.0 sec	T.P+2.37 m	S 37° E (河道中心)	"	"
江戸川	-1.0~12.5 Km 13.5 Km間	" 1/45	H=2.0~3.0 m T=5.0~6.0 sec	H=5.0~6.5 cm T=0.7~0.9 sec	Y.P+4.80 m Y.P+5.50 m	姉ヶ崎方向, 不要津方向 富津方向	"	"
淀川浦浜工	-1.1~4.5 Km 5.6 Km間	" 1/30	H=2.50~3.50 m T=7.0~13.5 sec	H=8.3~11.7 cm T=1.28~2.46 sec	O.P+5.20 m	河道中心 中心より左側 中心より右側	模型周囲に クロス張り防風 柵	上流エッジの振子型 (幅6cm, 高さ90cm)の造 波機と6基連続した全 幅36m)
江戸川浦浜工 (河口港)	-4.0~2.0 Km 6.0 Km間	" 1/45	H=3.20 m T=6.50 sec	H=7.0~7.7 cm T=1.05~1.1 sec	Y.P+4.80 m Y.P+5.50 m	姉ヶ崎方向	模型周囲に クロス張り防風柵	"
揖斐川	-2.0~8.6 Km 10.6 Km間	水平 1/65 鉛直 1/25 防風柵 1/25	H=3.00~4.00 m T=6.50~8.00 sec	H=9.2~12.9 cm T=1.14~1.40 sec	T.P+4.00 m T.P+4.50 m	SSE, S12° E, S, SSW	"	"

表-1 鹿島試験所で行った模型実験一覽表

河道と海上する波が受ける変形は前述のごとく屈折、回折、反射、研波、摩擦によるもの、堤防への波の打ち上げ等である。この等の変形が全模型では正規模型の場合に較べるとどのように異なるかと略観する。屈折；これは $C_1/C_2 = \sin \alpha_1 / \sin \alpha_2$ (ここに C_1, C_2 はそれぞれ領域1, 2における波速, α_1, α_2 はそれぞれ領域1における入射角, 領域2における屈折角である。) の式を見ると波の屈折は=領域における波速の逆数。また波速は比水深 h/L (ここに h は水深, L は波長) の関数となる。局部的には、波の縮尺と模型の鉛直縮尺にしたがって縮尺すべきであろう。回折；これは屈折の場合と異なり回折係数の分布図は波長と平面形によつてきまるものであり、波の縮尺はむしろ平面縮尺にしたがうべきであろう。(屈折、回折係数は波長の小さいかぎり、波長の関数と見なしてよめよう)。反射；これは前二者と異なり、波形：う配(H/L)、比水深(h/L)、海底：う配、入射角度、構造物の状態(たとえば堤防の形状、う配等)の関数と考えられる。特に波形：う配、堤防形状が反射率を支配する大きな要素であることは、模型および波と実とを比べると一般に望ましくないと示している。研波；研波形式および研波の高、研波水深は一般に波形：う配、および海底：う配の関数と考えられ

る。これも全模型は望ましくなからう。堤防への波の打ちあげ；これは波形こう配(H_0/L_0)，比堤脚水深(h/L_0)，海底こう配，入射角度，構造物の状態等の関係と考えられる。二次元的に見ると波と鉛直縮尺にしたがって縮尺すべきと考えられるが，平面的な打ちあげ高の分布を考える場合には波長の縮尺とむしろ水平縮尺にしたがわせるべきで，これも全模型は好ましくない。摩擦；これも波形こう配の関数と考えられる。

以上のように各変形に与える全の影響は大きく厳密な意味での全模型は好ましくないと考えられるが，畠永，松村等⁽¹⁾は次のような条件のもとに平面全模型の基礎的検討を行なっている。すなわち，①全率は小さい(この場合2程度)，②波形こう配は必ずませない。すなわち水平縮尺あるいは鉛直縮尺のどちらか一方にしたがって縮尺する。③堤防形状および堤防のごく付近の形は全めない。これ等の条件のもとに，正規模型，全模型の両者について実験を行ない次のような結論(要約)を得ている。(1)模型の堤防こう配，堤防付近の地形は全ませない方がよい。(2)屈折および碎波現象が予想される場合には横縮尺波は適当ではない。(3)縦縮尺に合わせた波と与えた場合，無全の場合と比較すると，回折波高は一般に大きくなり，波高分布および打ちあげ高分布は場所的変動状態の距離のスケールが大きくなる。(4)縦縮尺に合わせた波と与えた場合，波高，打ちあげ高の局所的な値を求めることはできない。全体的な分布として見るべきで，実験結果は一般に大きい値となる。

この実験結果に基づき，土木研究所鹿島試験所において，全2(水平縮尺 $1/65$ ，鉛直縮尺 $1/32.5$)の揖斐川河口部(河口より上流約8kmほど)の模型を作り実験を実施中である。波の縮尺は鉛直縮尺にしたがい $1/32.5$ とし，堤防形状はT.P.E 0m以上とやはり鉛直縮尺 $1/32.5$ に全めずに製作している。測定項目は波高の縦断波高分布，堤防への波の打ちあげ高，越波量である。この実験の目的は揖斐川河口部の高潮に対する堤防高を決める資料を得ようとするものと局所的な波高分布，打ちあげ高よりも，むしろ河道全体的な波高分布，波の打ちあげ高を把握し十分と考えられ，また，基礎実験の結果から，この模型における波の打ちあげ高は，正規のものにくらべく割程度大きめに出ることが認められており，実験目的は応用せられるものと考えられている。

4. あわりに

波浪遊上に関する固定床模型実験の現状と問題点について通覧した。波の実験は風の影響を強く受けるので，模型と小型にしても室内実験とすることが望ましい。そのためには，全模型に関する検討をさらに充実させることが必要であろう。また，河道内の波浪遊上現地観測が切望され，それがまた実験技術の向上に反映されるであろう。

〔参考文献〕

- (1) 細井，畠永，橋本：荒川下流部の波浪実験について，土木技術資料 Vol.5 No. 11
1963年 11月号
- (2) 須賀，山田：河道内波浪遊上と水理実験 土木技術資料 13-12，1971年12月号
- (3) 畠永，松村，九津見，山下：本曹三川高潮対策模型実験報告書(I) 土木研究所資料 オ749号
昭和47年3月 建設省土木研究所