

小河川の河口を通じた長周期波遡上の現地観測 —日立市瀬上川の例—

FIELD OBSERVATION ON PROPAGATION OF LONG-PERIOD
WAVES INTO A SMALL RIVER CHANNEL - AN EXAMPLE OF
THE SEGAMI RIVER IN HITACHI CITY -

栗原一美¹・宇多高明²・鱈谷純夫³・高野泰隆³

大木康弘³・神田康嗣⁴

Kazumi Kurihara, Takaaki UDA, Sumio NAMASUYA, Tairyu TAKANO,
Yasuhiro OHKI and Yasutsugu KANDA

¹茨城県高萩土木事務所河川整備課長(〒318-0003 茨城県高萩市大字下手綱1405-2)

²正会員 工博 (財) 土木研究センター審議役なぎさ総合研究室長(〒110-0016 東京都台東区台東1-6-4 タカラビル)

³(株)水圏科学コンサルタント(〒145-0064 東京都大田区上池台1-14-1)

⁴(株)水域ネットワーク(〒134-0088 東京都江戸川区西葛西6-16-7 第2白子ビル)

The wave propagation process caused by the penetration of long-period waves into the mouth was investigated through field investigation, taking the Segami River flowing into Hitachi Port in Ibaraki Prefecture as an example. Five wave gauges and current meters were installed around the river mouth and in the river in September, 2002. Long-period waves were measured during two typhoons and one storm. Long-period waves of the period 100-120s selectively invaded the river channel and wave amplitude increased two times that of the river mouth. Numerical simulation was carried out in order to reproduce the long-period waves and to examine measures against long-period waves. As a result, the effectiveness of the pond damping the long-period waves was confirmed.

Key Words: *long-period waves, Segami River, field observation, numerical simulation, measures*

1. まえがき

茨城県管理の二級河川瀬上川は、日立市の久慈浜駅周辺の人家密集地域を流れ、日立港へ流入している。久慈浜駅周辺は河道幅が狭く周辺地盤高も低いために、これまでたびたび浸水被害を受け、早期改修が望まれてきた。1979年10月18日の洪水では、時間最大雨量27mm/hrの降雨により駅周辺部の約200世帯が浸水し、駅前で最大湛水深0.8mを記録した。このため河道拡幅や掘削などからなる河川改修工事が1972年から1994年にかけて行われた。これによって洪水に対する安全度は向上したが、新たに河口からの波浪(長周期波)の侵入による水害という問題に遭遇した。すなわち河口から「うねり」が遡上し、河口から約700m上流の暗渠部付近で溢水する事態が発生

したのである。溢水は付近の家屋に被害を及ぼすことから早急な対策が必要とされている。

このことから、筆者らは瀬上川における遡上波対策の立案を目的とした検討を行ってきた。その結果の一部について、すでに前報¹⁾²⁾において、うねりの遡上現象の実態把握とその対策について述べたが、本研究では、新たに2002年の高潮災害時にうねりの現地観測を実施し、それらのデータをもとに先の検討結果について検証することとした。なお、瀬上川の流域面積は1.59km²、計画高水流量は31m³/s(渚橋)で、二級河川指定区間の流路延長は750mである。

2. 現地観測の概要

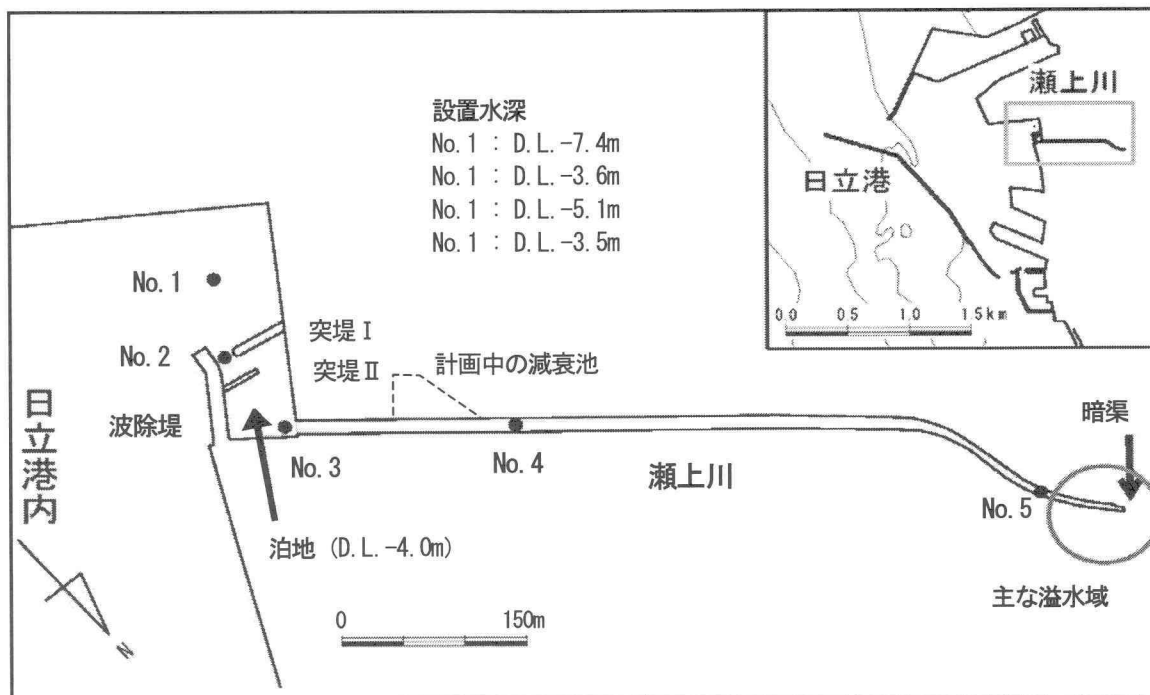


図-1 観測位置図 (測定点No. 1～No. 5)

瀬上川河口は、図-1に示すように日立港奥の、波除堤および突堤で囲まれた泊地内に位置する。波除堤および突堤はともに不透過構造であり、河川流の流出路としては泊地の開口部分（幅10m）のみである。泊地の水深は約5mであり、瀬上川河口は水深約4m、幅約8mで泊地に繋がっている。河口から上流側約700m付近の暗渠まではコンクリート3面張りの開水路であるが、約400mまでが幅8mの複断面、それより上流部は単断面で徐々に幅が狭まり、暗渠部分での川幅は約3mとなる。久慈浜駅周辺は地盤高がT.P. +1.1m程度と低く、港湾用地の地盤より低いこともあって、河川改修以前は洪水被害が発生し易い状況にあった。現在、洪水被害は減少しているが、例えば、1997年9月19日撮影の写真-1のように、うねりの遡上が顕著となり、大潮期の満潮時などの条件が重なると増幅したうねりが暗渠部前面で大量に溢水する状況となっている。

現地観測は、図-1にNo. 1～No. 5で示す5地点に水位計・流速計を設置し、2002年9月～10月の約1ヶ月間行った。No. 1（設置水深：T.P. -7.4m）は泊地の外側に位置し、これにより泊地の防波堤による波の遮蔽を受ける前の入射波条件を調べることができる。No. 2（T.P. -3.6m）は泊地の開口部中央に位置し、泊地の開口部のすぐ内側にある波除堤への入射条件を調べるためのものである。No. 3（T.P. -5.1m）は瀬上川の河口にあり、河口部の入射波条件を調べるためのものである。さらにNo. 4（T.P. -3.5m）は減衰池の直上流に設置し、減衰池の効果を調べることを目的とする。No. 5は、瀬上川上流部の河道改修区間の最下流端に位置する。

No. 1～No. 4に設置した波浪・流速計は、超音波または



写真-1 瀬上川 (No. 5付近) を遡上する波浪
(1997年9月19日撮影)

水圧センサーを積載した波高・水位計、および電磁センサーを有する2方向成分型流速計の複合機である。これらはセンサーと記録部が一体となった自己記録型の計測器であり、計測は、1時間毎に20分間0.5s間隔で行った。No. 5は上記のものとは異なり、空中から水面に向けて超音波を発射し水面までの距離を計測するもので、高潮発生時の1時間から3時間、1s間隔で連続測定した。

3. 高潮発生時の気象・海象条件

観測期間中には、以下の2台風および1低気圧という3パターンの異なる気象擾乱による波浪を観測することができた。

(1) 台風21号(T0221)による擾乱

2002年10月1日には、台風21号が930hPaで神奈川県に上陸し、東北地方の太平洋側を北上した。台風は猛スピードで通過したため、気象擾乱の継続時間は短かったが、風速50m/s以上の猛烈な風のため、茨城県内での鉄塔の倒壊など多くの被害が発生した。瀬上川では、10月1日の21時から23時頃にかけて溢水被害が発生したが、台風の通過速度が非常に速かったことと小潮期であったことから、溢水時間は短かった。

(2) 台風22号(T0222)による擾乱

2002年10月13日、14日には台風22号が通過しており、はるか東方海上を移動したにもかかわらず沿岸では船の転覆や人的な被害が多く生じた。瀬上川においても、長周期のうねりの来襲によって溢水被害が発生したが、10月1日と同様、大潮でなかったことで大きな被害には至らなかった。

(3) 低気圧による擾乱

2002年10月22日には、本州南岸を発達しながら東進した低気圧によって沿岸部に高波が来襲した。10月22日未明に大潮期の満潮と重なったため、瀬上川では観測期間中で最大の溢水被害となり、久慈浜駅周辺が冠水した。

4. 通常波浪の特性

水位の観測結果から、FFTによる数値フィルタで30s以上の長周期成分を除去した後、ゼロアップクロス法によって各時刻の波浪諸元を求めた。これらによると、各地点における波浪・流速の変動特性は以下であった。

泊地外のNo. 1では、台風21号の来襲した10月1日の22時には最大波高2.76m（周期12.6s）、有義波高1.84m（周期12.1s）が発生している。台風の猛スピードを反映して、波浪は非常に短時間で発達・減衰している。また台風22号の襲来した10月14日の1時には、最大波高1.82m（周期14.3s）、有義波高0.93m（周期14.6s）が発生しており、概ね有義波高で0.7m程度（周期13～14s）が2日程度継続している。低気圧の擾乱が生じた10月22日の3時には、最大波高0.79m（周期11.4s）、有義波高0.57m（周期11.9s）が発生した。

泊地の入口に位置するNo. 2での波高の変動は、No. 1に比較して全体的に小さかった。泊地の防波堤によって波浪が遮蔽されているためと考えられるが、それに比較して平均軌道流速が2～5倍程度と非常に大きいのが特長であった。これは、港口部で波高変動が流速に変化して港内にエネルギーが流入していることを意味している。

瀬上川河口のNo. 3では、波高の変動は微小で、通常波浪は泊地内にはほとんど進入していなかった。同様に、瀬上川の河道内のNo. 4～No. 5では波高の変動は微小で、通常波浪は河道内には進入していなかった。

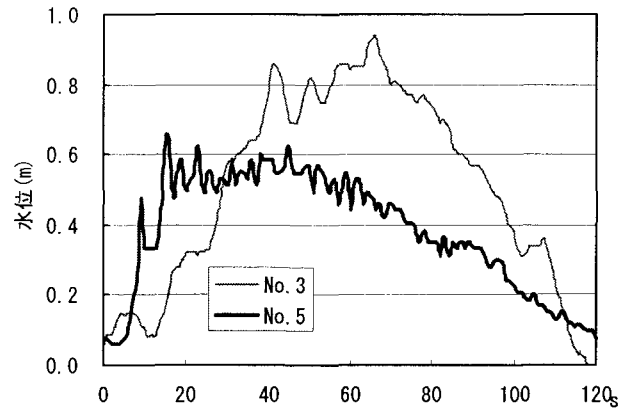


図-2 長周期波1波の時間波形

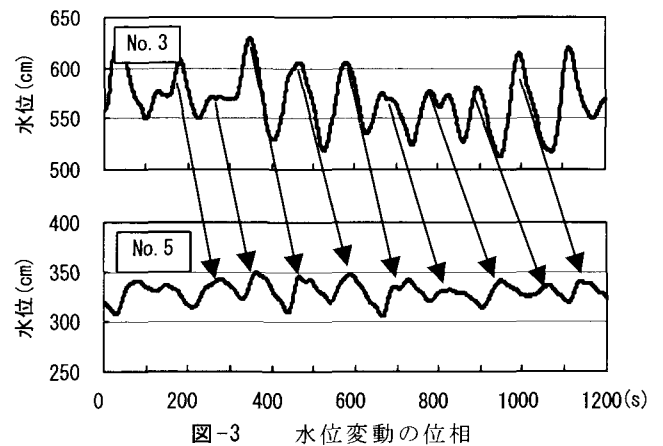


図-3 水位変動の位相

5. 長周期波の特性

前述の通常波浪とは逆に、水位の観測結果からFFTによる数値フィルタで30s未満の短周期成分を除去した後、ゼロアップクロス法によって各時刻の最大波および平均波を求めた。この結果求められた長周期波の特性は次のようであった。

泊地外のNo. 1では、通常波浪の波高が高い時期に長周期波も発達する傾向が顕著であり、長周期波の波高が高い時期には周期が100s弱で安定的になる傾向が見られた。また通常波浪の周期が10s以下の場合、長周期波はほとんど発達しない傾向があった。長周期の波高は通常波高の40%程度であり、一般に想定される長周期波高に比較してかなり大きかった。このことは日立港内での共振等の影響を受けている可能性を示唆している。

泊地内のNo. 3および上流のNo. 5における長周期波の波形の一例として10月1日23時（21号台風通過時）における波形を図-2に示す。両者は同一の波であるが、No. 5では大きく前傾した段波となっている。段波の先端部には、非常に短周期の分裂波を数多く伴っており、これが写真-1に見られた波形として顕在化したため、あたかも通常の波浪が遡上しているように見えたのである。

表-1 高波浪時期の波高の比較

高波浪時期	発生時	No. 1の通常波高 (m)		No. 4の長周期波高 (m)	
		最大波	有義波	最大波	平均波
1回目	10月1日22時	2.76	1.84	0.83	0.64
2回目	10月13日19時 ～14日1時	1.82	0.93	0.78	0.45
3回目	10月22日3時 ～22日18時	0.87	0.57	0.71	0.42

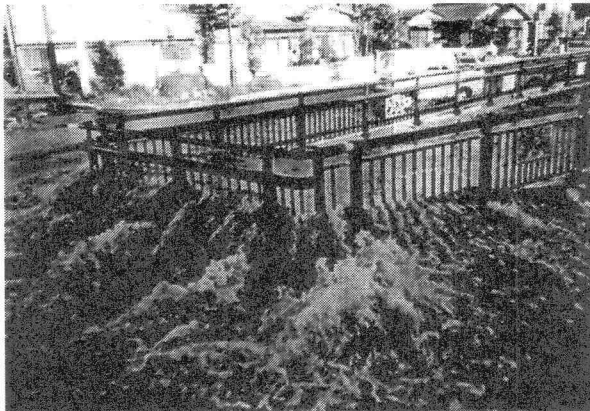


写真-2 暗渠前面での溢水状況
(2002年10月22日撮影)

また同じ時間における図-3に示す水位変動の位相から推定すると、段波はNo. 3とNo. 5の2点間の距離630mを160s (波速3.9m/s) で到達しており、その伝播速度は、河道の平均水深約3.5mから得られる長波の波速 $\sqrt{gh} = 5.9\text{m/s}$ と比較するとかなり小さく、河道における摩擦抵抗を強く受けている。

1回目の高波浪の襲来時期 (10月1日～2日) は、観測期間中の最大波が来襲した時期であり、発生した長周期波高も最大であったが、来襲した通常波浪が低い割には他の2次期における長周期波の波高も同規模となっている (表-1)。特に3回目の高波浪では、比較的長時間の荒天であったことと、大潮時期であったことが重なり、冠水被害が発生するほど大きかった (写真-2)。これより、台風が速い速度で大きな波浪を伴って来襲したときよりも、遠方の台風や低気圧からのうねりが大きな長周期波を発生させるという特性が伺える。

6. 長周期波の伝達機構

上記の水位変動からエネルギースペクトルを計算したのが図-4である。泊地外のNo. 1では通常波浪成分の12～14s程度に鋭いピークがあるが、60～90s程度にも高いエネルギーがある。泊地内のNo. 3では100s程度の長周期波が増幅してエネルギーの増大が見られるが、水位変動の

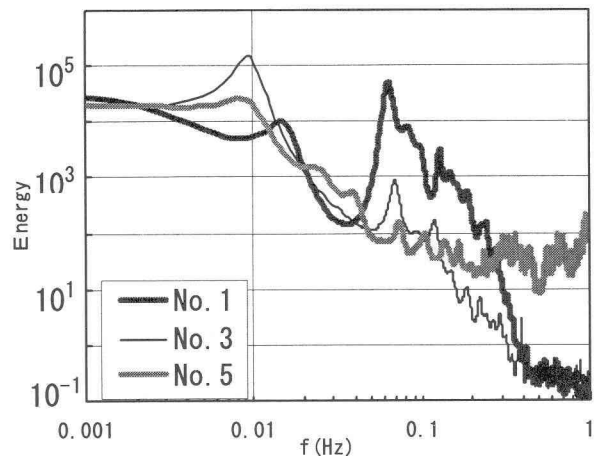


図-4 水位変動のエネルギースペクトル

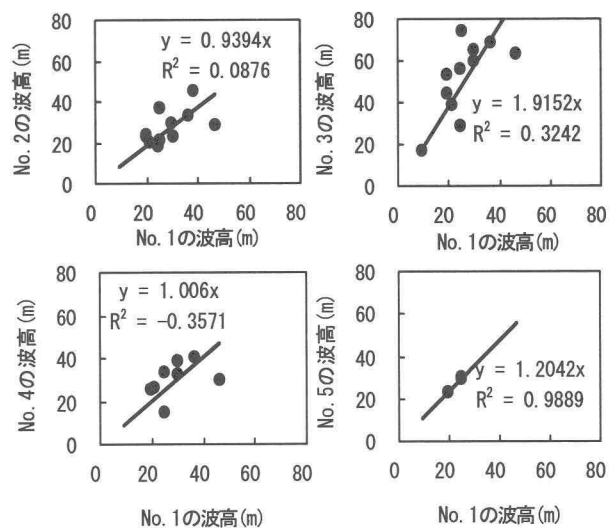


図-5 エネルギーピークで換算した
長周期波高の比較

エネルギースペクトルは河道内のNo. 5に到達するまでに1オーダー程度減衰している。

各地点におけるエネルギースペクトルは図-4に与えられ、これより長周期波のエネルギーピークが読み取れるので、No. 1のエネルギーピーク周波数を基準として、長周期波のエネルギー比率を波高比として表示すると図-5となる。これによれば、No. 2では0.94倍とほぼ変化はないが、No. 3では1.92倍、No. 4では1.01倍、No. 5では1.20倍となった。このように長周期波は泊地内では泊地外における入射波の2倍程度に増幅し、河道内では徐々に低減するが、入射波以上の波高を保ったまま河川の上流端 (暗渠部) に到達していると推定される。

No. 1～No. 4における水位と流速の変動を図-6に示す。図中のNo. 1の水位と流速の位相は1/4波長のずれがみられるので、重複波となっていることが伺える。一方、No. 2とNo. 4では、水位と流速変動の位相がほぼ一致していることから、進行波として通過していると考えられる。

これらの結果から、長周期波の伝達機構を推定すると次のようである。

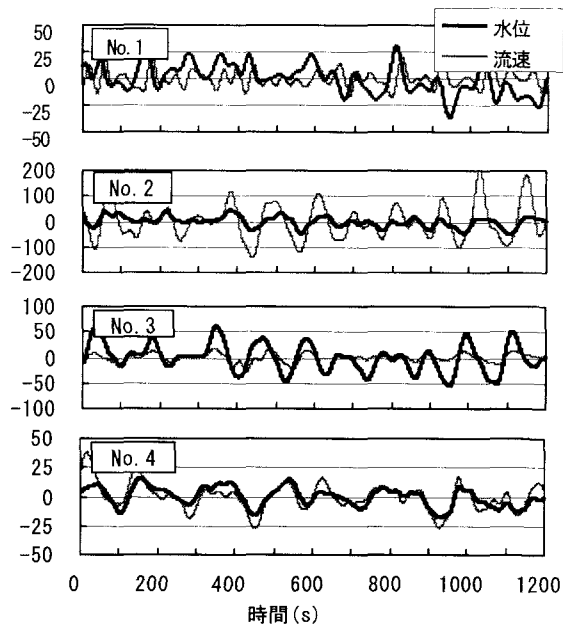


図-6 水位変動と流速変動の位相
*縦軸のスケール：水位(cm)・流速(cm/s)

- ① 泊地外 (No. 1) では、外洋からの高波浪に伴う長周期波、および日立港港内の共振による長周期波が存在し、比較的周期帯が広く、平均して70~90s程度の重複波となっている。
- ② 泊地外の長周期波から、選択的に100~120s程度の波浪が泊地内に侵入し、約2倍に増幅される。
- ③ 増幅された水位変動は、河道内で進行波として伝播し、底面や側面の摩擦抵抗でエネルギーを失いつつも中間で段波となり、暗渠部に到達する。

7. 数値モデルによる検討

長周期波の伝播実態を観測することができたことから、これを検証データとして数値モデルによる検討を行った。使用した数値モデルは、前報^{1) 2)}と同様、線形長波モデルであり³⁾、長波近似した運動方程式を差分法で解く方法とした。x, y 軸を水平面上に、z 軸を静水面上を原点として上方が正になるように座標系をとり、コリオリ力および底面摩擦によるエネルギー損失を無視すると、基礎方程式として次の運動方程式(1)および連続式(2)が

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial q_x}{\partial t} &= -g(h+\zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial x} \\ \frac{\partial q_y}{\partial t} &= -g(h+\zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial y} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) \quad (2)$$

ここに、 q_x, q_y : x, y 方向の単位幅流量
 h : 水深 ζ : 静水面からの変動量

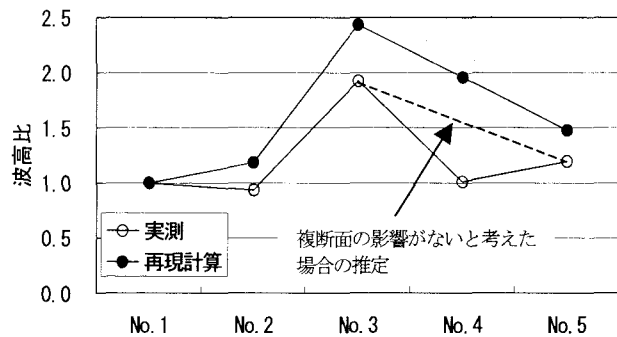


図-7 現況再現計算と実測の比較
(長周期波の波高比)

得られる。

計算領域は図-1に示した範囲であり、図の左側を入射境界とした。計算格子は、瀬上川の河道上端部の幅が約3mであることを考慮して1m間隔とした。これにより、河道が約8mから約3mまで変化する地形条件は再現したが、瀬上川の暗渠付近(図-1のNo. 5付近)で蛇行している部分は、格子が階段状となって反射境界となることが予想されたので、直線と仮定している。構造物の境界は、護岸、波除堤、2基の突堤ともに鉛直壁と仮定して全反射とし、水深は日立港側を8m、泊地内を4mで一定、河道内は4mから3mへ約1/600の一定勾配とした。後述する減衰池は、河道と同一の水深から陸側境界まで1/10の勾配をつけている。なお、減衰池の上流端には、遡上する波の集中を阻止する目的で堤長20mの導流堤が流下方向に計画されているが、これは鉛直壁の突堤条件として取り入れている。

ここで、検証データの設定上重要な特性として、地点間で長周期波の周期の変化がみられたことがあげられる。例えば、No. 1では、高波浪時の平均周期が60~90s程度であるのに対して、No. 3では110s程度、No. 4では120s程度と周期が長くなっている。これは地形に応じて周波数間のエネルギーの移流が生じているためと考えられるが、数値シミュレーションではこのような実現象を再現するには至っていない。これは、数値モデルの入射波条件が規則波であること、種々の地形が形成する領域境界でのエネルギー損失を無視していることにも関係しているかも知れない。また、規則波であることから、いずれかの地点における値を代表周期と設定して、各地点の波高やエネルギーの比を求める必要がある。ここでは、河道内の長周期波伝達の起点であるNo. 3での値を代表値と考え、平均周期106.7sを用いることとした。

図-7に各観測点における現況再現結果を示す。これによると、全体的に計算結果が大きめであり、特にNo. 4での相違が顕著である。これはNo. 4の河道断面が複断面であり、数値計算ではその影響までは再現できないことに起因している。しかしながら、No. 4が複断面でなかった場合、図の破線のように波高比は低減すると推測されるので、波高比の縦断的变化傾向としては良好な一致を

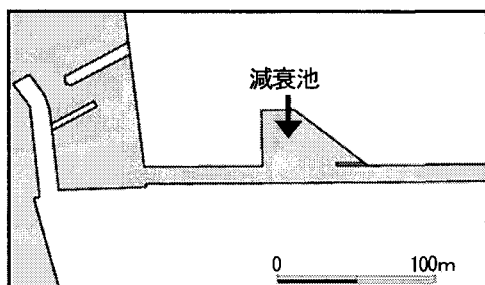


図-8 高潮対策の計画

見ることが分かる。数値計算はやや過大な評価を行うものではあるが、概ね現象の傾向を捉えることが可能と考えられる。

前報^{1) 2)}では、図-8に示すように洪水流への影響が小さく、波浪抑制に効果的な対策案として、波除堤+遊水池を最適案として計画した。この対策を行ったとき、長周期波については減衰池の設置によって10~20%程度の低減効果が期待された。そこで、現況再現と同様の条件で試算を行い、結果の比較を行ったのが図-9である。これによれば、計算上は30%程度の低減効果が認められる。計算が実測に比べて約25%過大な結果を与えることを差し引かなければならないが、計画に近い効果が得られる可能性が示されたと考える。

8. あとがき

前報^{1) 2)}では、瀬上川における長周期波を含む波浪対策について数値モデルによる検討を行った。これに基づいて最適対策案として波除堤+遊水池案を提案した。前報では現地での実測までは行うことができなかったが、今回波除堤の建設後現地実測が可能となり、波除堤の効果とともに長周期波の特性をかなり明らかにでき、それをもとに遊水池による効果をより詳しく知ることができた。これらより瀬上川の波浪対策はかなり自信をもって進められるようになった。

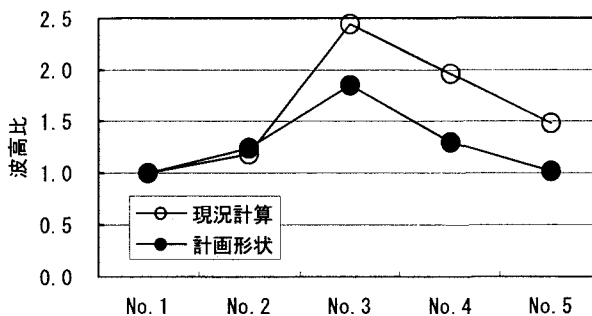


図-9 計画形状の効果の予測計算結果
(長周期波の波高比)

一方、数値モデルの検証では25%の誤差が表われており、不規則性や領域境界でのエネルギー損失など改良すべき点もみられる。今後遊水池の建設も行われるが、その際には機会があれば長周期波の減衰について調べてみたいと考えている。

参考文献

- 1) 宇多高明・山中 博・助川 進・高野泰隆・大木康弘・神田康嗣・芹沢真澄(2002): 河口からの遡上波による高潮災害とその対策-茨城県の瀬上川の例, 水工学論文集, 第46巻, pp. 349-354.
- 2) Takano, T., T. Uda, Y. Ohki, Y. Kanda, M. Serizawa, H. Yamanaka and S. Sukegawa (2002): Inundation caused by swells and long-period waves penetrating from river mouth and its countermeasures - a case study at the Segami River, Ibaraki Prefecture, Japan, Jour. of Hydrosience and Hydraulic Engineering, Vol.20, No.2, pp.169-185.
- 3) 高山知司・平石哲也(1988): 数値計算と現地観測による港内副振動特性の検討, 港湾技研資料 No. 636, 70p.

(2003. 9. 30受付)