

放水路中の越波伝達波について

TRANSMITTED WAVES DUE TO OVER TOPPINGS IN DISCHARGE FLUME

東江 隆夫¹・伊藤一教²・灘岡和夫³
Takao TOE, Kazunori ITO and Kazuo NADAOKA

¹正会員 MS 大成建設(株) 技術センター (〒245 神奈川県横浜市戸塚区汲沢6-30-17)

²正会員 工修 大成建設(株) 技術センター (〒245 神奈川県横浜市戸塚区汲沢6-30-17)

⁴正会員 フェロー 工博 東京工業大学 (〒152-8550東京都目黒区大岡山2-12-1)

Transmitted waves due to overtopping and due to waves which pass under the caisson in a discharge flume is sometimes a problem for stable operation of pumping works. The currents make influence on not only the transmitted waves but also the incident waves. The phenomena, therefore, might be quite complicated. To understand the phenomena, the hydraulic model tests were carried out. The transmitted waves due to overtopping in the currents sometime quite larger than the transmitted waves without currents. To simulate the transmitted waves, a new method is proposed. The methods are based on the Boussinesque equation. The mechanism of the flow under and over the caisson are modeled by a simple pipe flow and non-linear long wave equations. The method is quite capable to represent experimental results.

Key Words : Transmitted waves, overtopping, discharge flume, Boussinesque equation

1. はじめに

発電所の放水路は、港湾の外にその放水口を設けることが多い。したがって、放水路は、外洋の波に直接さらされる。安定取水確保のためには、放水路の水位変動は小さいことが必要で、放水路の波高は、規定値以下に抑えられなければならない。

しかし、建設コストの縮減の要請から、放水口のケーソンの天端高さはできるだけ低くする必要がある。天端高さが低い場合には、越波により放水路内に越波伝達波が発生する。放水路内の波高は、その越波伝達波に加えて、放水口から侵入する透過波があり、両者が重合して、流れの中を伝播するという複雑な現象となる。さらに、放水口前面の波高も流れによって変化する。本研究は、このような波浪場の特性を水理実験で調べるとともに、放水口をモデル化し、入射波から透過波および越波伝達波を同時に解析する数値解析手法を開発しその妥当性を検証した。

水深40cmの水槽中央に放水路模型を設置した。放水路は、図-2に示すように、幅30cm、長さ6m、放水路の壁および放水口ケーソンの天端高さは48cmである。放水口ケーソンには、水中に放水用の孔があり、そこを通して外海の波が透過する(図-2 (b))。放水口ケーソンの長さは30cmで、孔の高さは6cmである。放水流は水路端部よりポンプを用いて所定の流れ(放水口での流速0.55m/s)を発生させた。

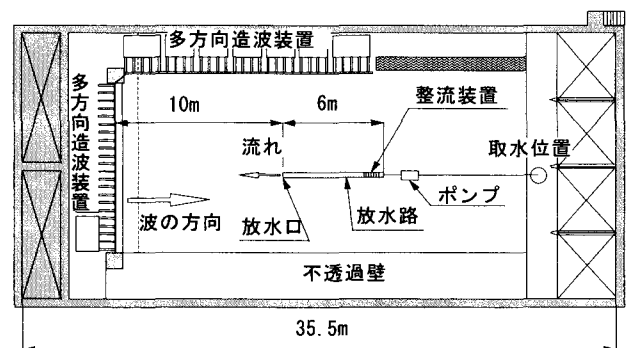
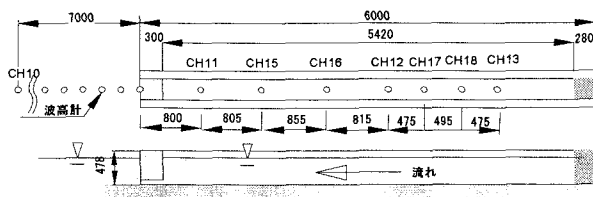


図-1 実験概要図

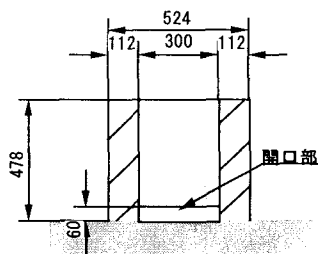
2. 研究内容

(1) 水理実験

水理実験の概要を図-1に示す。幅17m、長さ35m、



(a) 側面図（下）と平面図（上）単位（mm）



(b) 断面図 単位（mm）

図-2 放水路の形状

表-1 実験ケース

入射波	周期(s)	波高(cm)	波向(°)	Smax	防波堤	流量	越波
規則波	2.5	17.3	0	∞	直立	on/off	on/off
	1.5	17.4	0	∞	直立	on/off	on/off
不規則波 (有義周期)	2.1	12.5	0	∞	直立	on/off	on/off
	(有義波高)	(有義波高)					

入射波は規則波と多方向波を用い、水路周辺と水路内の水位および流速を測定した。波高および流速の代表的な測定点を図-3に示す。また、表-1には、実験ケースを示す。

3 実験結果および考察

図-3と4は、入射波高17.4cm、周期1.5sと入射波高17.3cmで、周期が2.5sの規則波が入射した時の、図-1に示した放水路内での水位の時系列を示したものである。横軸は造波開始からの時刻である。それぞれ、流れの有無、越波の有無の組み合わせで比較している。流れがある場合が、平均水位が高くなっている。どの場合でも、場所によって波形が異なっていることがわかる。これは、放水路内で重複波が形成されていることによる。流れが有る場合、放水路内の水位は無い場合に比べ、放水口の損失抵抗のため約3cm程上昇する。

流れが無い場合、越波の有無で水位を比較すると、越波が有る場合は、放水口ケーソン下部からの透過波に、越波伝達波（短周期波を含む）が重なる。一方、流れが有る場合、透過波だけの場合は、流れが無い場合の水位変化とほぼ同じである。しかし、越波伝達波が有る場合には、無い場合と同様に透過波に短周期の伝達波が重なっているものの、その値は、正側に大きく、透過波だけの場合の2倍以上となる。

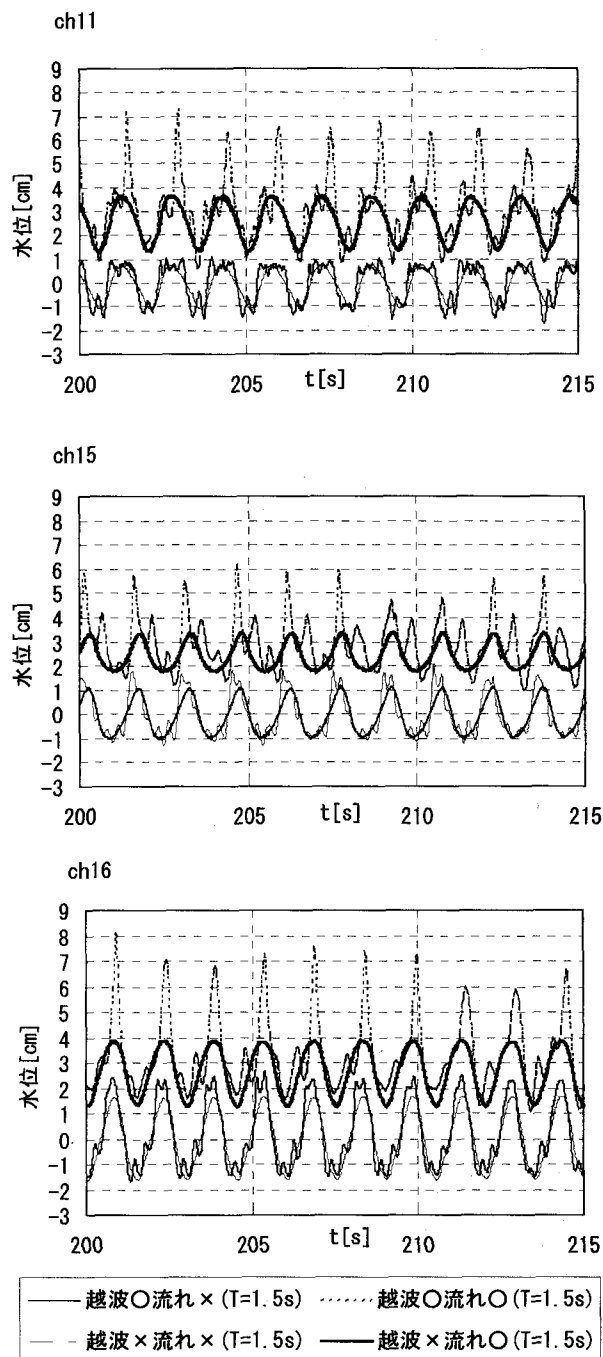


図-3 放水路内波高の比較（実験値）T=1.5s

この波高の増大の最も大きな理由は、越波量の増大にある。図-5は、ケーソン上の同時刻の水位の時系列を示している。明らかに、T=1.5sの場合が、越波量が大きいことを示している。

単位時間当たりの越波流量は、周期1.5sの流れ有り、流れ無し、周期2.5sの流れ無し、流れ有りの順番で45.4、24.6、23.5、8.7m³/s/mであった。周期によって、流れが越波量に及ぼす影響が、異なることがわかる。

図-6～図-9には、水路の延長線上の波高分布と平均水位分布を示している。

越波量に直接関与するのは、当然ケーソン前面の

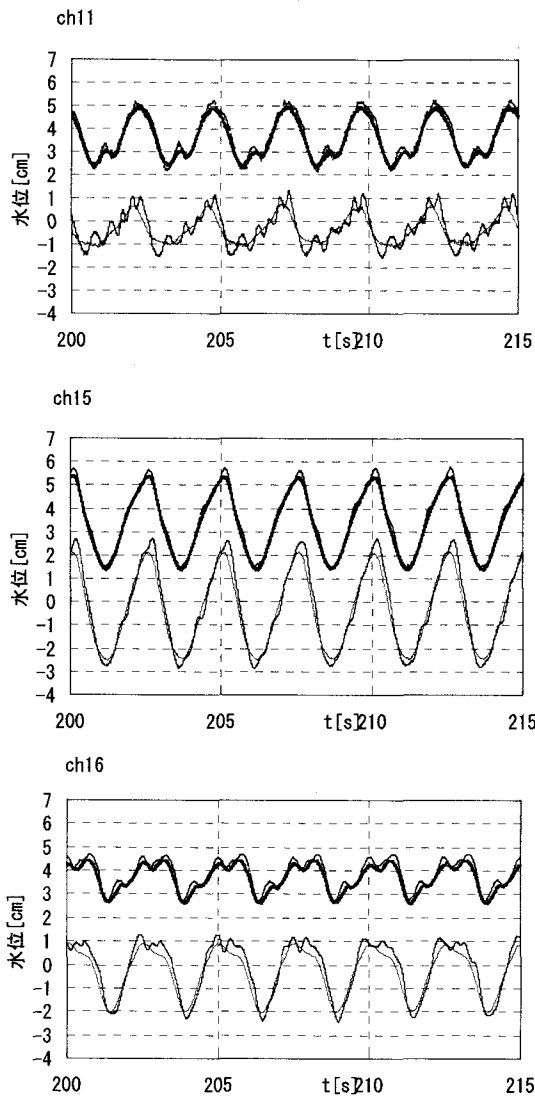


図-4 放水路内波高の比較（実験値） $T=2.5s$
（判例は図-3と同じ）

平均水位と波高である。図-6～9を見ると、平均水位については、有意な差は見られない。波高についてはみると、沖側では、周期の違いによる差はそれほどないが、前面では周期 $1.5s$ の方が、全て $25cm$ 以上になっており、周期 $2.5s$ では、前面より沖側の方が高い傾向を示しており、前面では確かに、流れがない方が $2cm$ ほど波高が高くなっている。天端高さは、 $10.0cm$ であるので、この $2cm$ の高さの差が越波量および伝達波の高さの差に現れている。

前面の重複波の波高が周期で異なるのは、ケーソン下部の孔を通る波の伝達波の大きさの差による。図-10～12は、水路内の波高を示している。前述のように、越波が無い場合には、重複波の形成が明瞭に見られる。越波が無い場合の周期 $1.5s$ と $2.5s$ を比較すると（図-10と図-12）、明らかに周期 $2.5s$ の場合が、波高が大きくなっていることがわかる。すなわち、ケーソン下部の孔を通る波の伝達波が周期 $2.5s$ の場合が、大きくなっている。したがって、相対的に、反射率は低下していることになる。これに

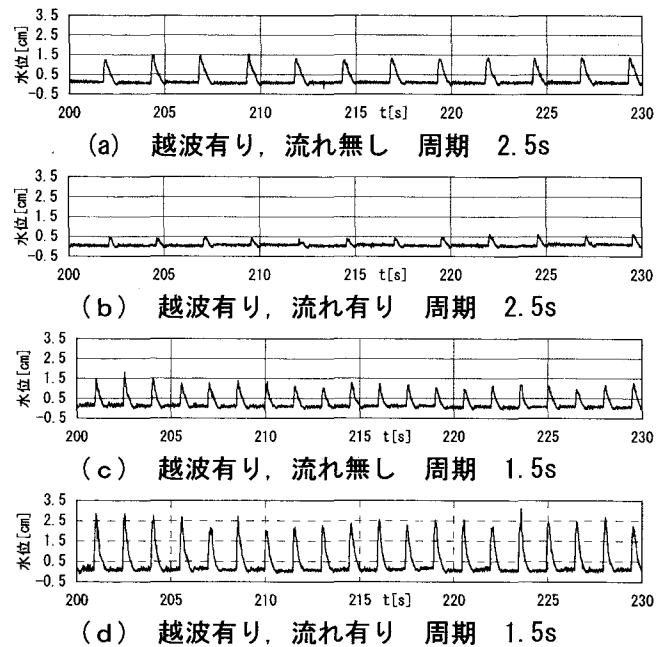


図-5 ケーソン天端上の水位の時系列 規則波実験

より、前面の波高が周期 $2.5s$ の場合、小さくなったことになる。図-11は、流れがある場合の周期が $1.5s$ の場合である。放水口側のほうが、波高が高いことがわかる。これは、越波伝達波が、発生時には短周期の波も合成しているのに対して、伝播する間に、成分に分かれていくためである。

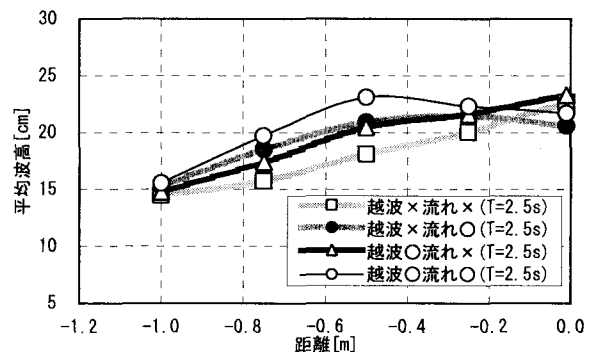


図-6 水路延長線上の波高分布 $T=2.5s$ 規則波実験

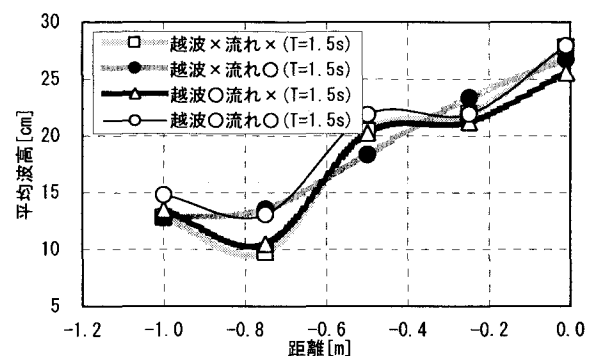


図-7 水路延長線上の波高分布 $T=1.5s$ 規則波実験

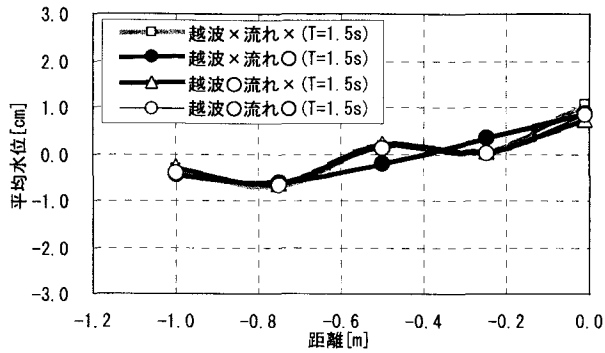


図-8 水路延長線上の水位分布 $T=1.5s$ 規則波実験

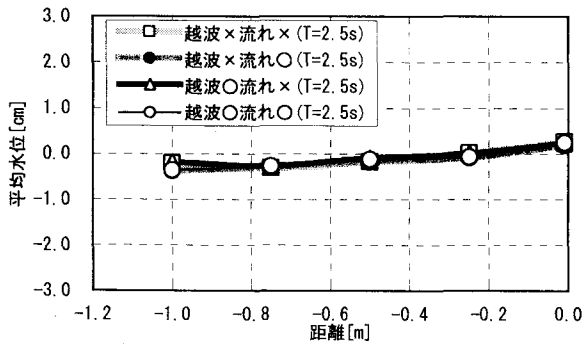


図-9 水路延長線上の水位分布 $T=2.5s$ 規則波実験

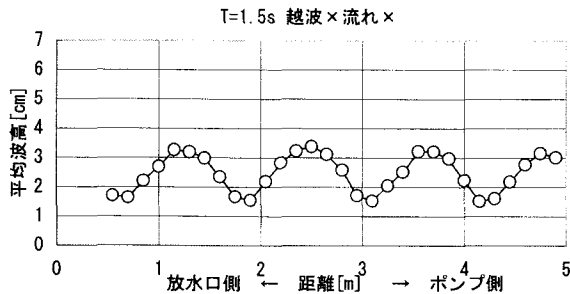


図-10 水路内波高分布 ($T=1.5s$, 流有り, 越波無)

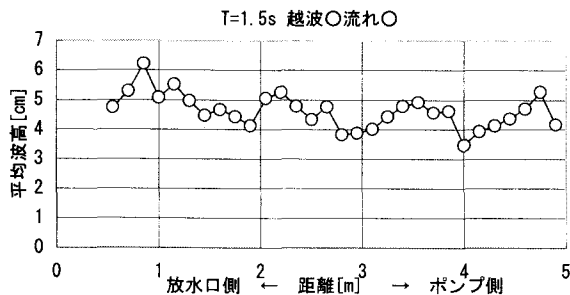


図-11 水路内波高分布 ($T=1.5s$, 流れ有, 越波有)

次に、一方向不規則波実験の結果について示す。
図-13と図-14は、水路中心軸上の放水路外の波高分布と内部の波高分布を示したものである。不規則波の場合、規則波に比べて条件の違いによる前面の波

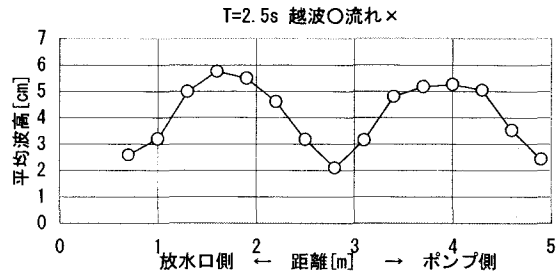


図-12 水路内波高分布 ($T=2.5s$, 流有り, 越波無)

高の違いが、顕著となる。図-13より明らかに、流れがある場合が、前面波高は高く、さらに越波が無いほうが高い。伝達波については、越波があるほうが、無い場合に比べて高く、流れがあるほうが高くなっている。

周期についてみると、越波有り、流れ有り以外は全体的に周期が長くなっている。これは、ケーソンを下部を通過する伝達波が、フィルター効果により、短周期の波がカットされたことによる。流れがあり、越波有りの場合は、越波による伝達波の効果が大きく、東江ら²⁾が指摘しているように、伝達波には、高周波成分が含まれることから、周期は短くなっている。

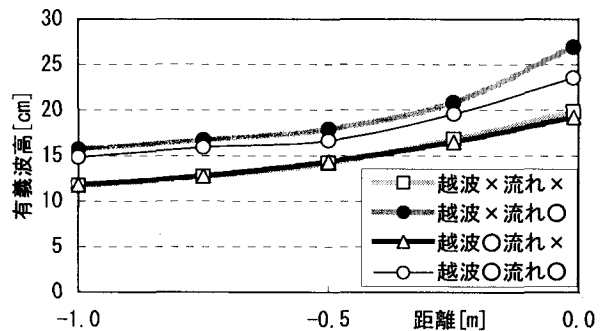


図-13 水路延長線上の波高分布 $T_{1/3}=2.1s$ 不規則波実験

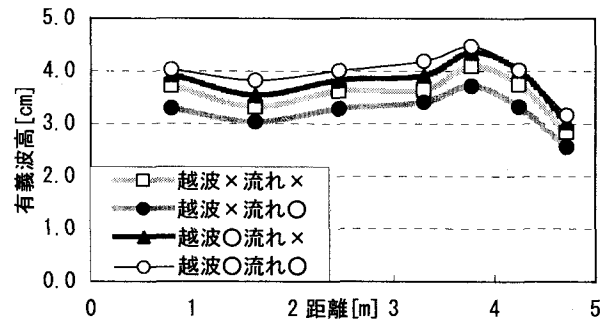


図-14 水路延長線上の波高分布 $T_{1/3}=2.1s$ 不規則波実験

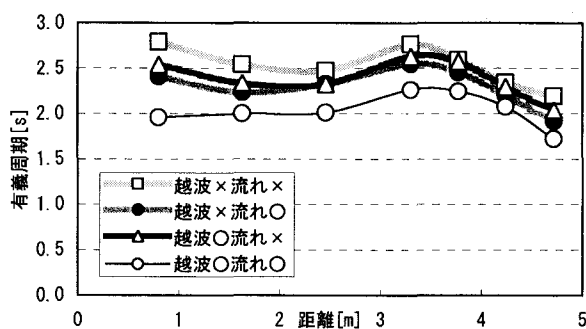


図-15 水路延長線上の周期分布 $T_{1/3}=2.1s$ 不規則波実験

4. 数値解析

4. 1 解析方法

入射波，越波伝達波，透過波，放水路内の波浪場を流れの中で同時に解析するために，解析領域を図-16に示すように3つに分割する．領域1は，通常のブジネスク方程式を用いて解く領域で，放水路の外側の平面的な領域と水路内である．領域2は，防波堤上で非線型長波方程式を用いて解く．また，領域3は，管路である．管の内部は解かないが，管路内の線流量を次式により求める．

$$\frac{\partial M_3}{\partial t} = -a \frac{c}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - f M_3^2 \cong a c \frac{g(\eta_1 - \eta_2)}{l} - f M_3^2 \quad (1)$$

ここに， a は孔の高さ， p は圧力， η_1 と η_2 はそれぞれケーソン前面および背面の水位， M_3 は管路内線流量， c は流量係数($=0.5$)である， f は，摩擦に依存する係数($=0.1$)である．

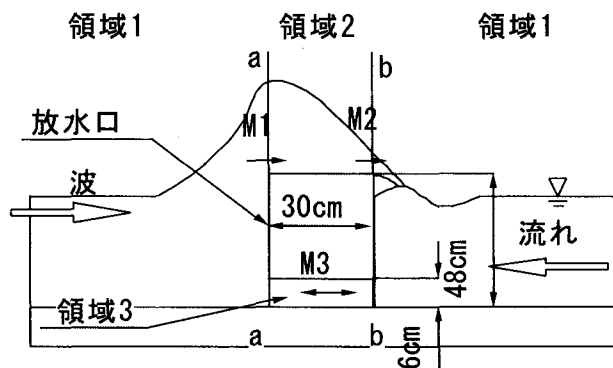


図-16 放水口断面と解析領域

各領域の接続は以下のようにして行う．領域1を解くときのラインa-aの線流量は図中の $M_1 + M_3$ で

ある．ラインb-bでは， $M_2 + M_3$ である．領域2を解くときには，岸沖の両境界で， M_1 と M_2 であり， M_1 は堰の公式より， M_2 は自由通過条件より求めた．領域3では放水ロケーソン前後の水位が境界条件となる．領域1の内，放水路内は越波伝達波による運動量の増加分(M_2 に起因する)を考慮する織田ら¹⁾および東江ら²⁾の方法にしたがった．すなわち，領域1では，式(2)によるブジネスク形の方程式を用い，領域2では，非線型長波の方程式 式(3)を用いた．

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial M^2}{\partial x} + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + D \frac{\partial w_f^2}{\partial x} + (u_f - u) w_f = \\ (B + 1/3) h^2 \frac{\partial M^3}{\partial t \partial x^2} + B g h \frac{\partial \eta^3}{\partial x^3} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial M^2}{\partial x} + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

ここに， M ：線流量， η ：水位， $D = h + \eta$ ， $B = 1/15$ である．

図-17は，前述した手法により解析した結果を実験と比較したものである．図中(a)は，CH10における，外洋の入射波の比較である．時刻，水位とも計算と実験はよくあっている．ただし，今回の計算は2次元計算としたため，反射波が実験に比べて顕著となる．したがって，その影響がでる前の造波後15s程度の計算時間とした．

(b)および(c)は，流れ無し，越波無しの，CH11，CH15の通過波だけの比較である．式(1)による通過波の再現が良くできているのがわかる．

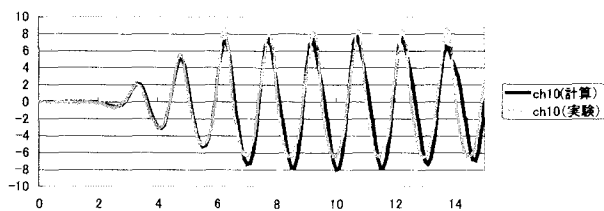
(d)は，流れ無し，越波有りの場合である．短周期波が発生する様子を再現している．短周期波発生位相はあっていない，これは，実際は越波水塊が飛んでケーソンより離れた位置に落下するのに対し，計算ではそのことを考慮せず，ケーソン直後で落下するようにしているためである．なお，図中には，越波伝達波を式(2)で計算せずに，単純にケーソン背後から M_2 の線流量を加えて計算した結果を細線で示している．この方法では，越波の短周期の波の発生は再現できないことがわかる．

(e)は，流れ有り，越波無しの通過波の状況である．流れがあるほうが，通過波は抑えられる傾向をあらわしている．なお，計算では定常な流れを求めると水路内だけでなく，全体に水位が上がる．図の結果は，初期の水位をあわせて比較している．図中の(f)および(g)は，流れ有り，越波ありの結果である．流れが無いばあい比べて大きい越波伝達波が発生している．また，この越波伝達波のうち，短周期は成分は，CH15では，遅れて進んでいることがわかる．

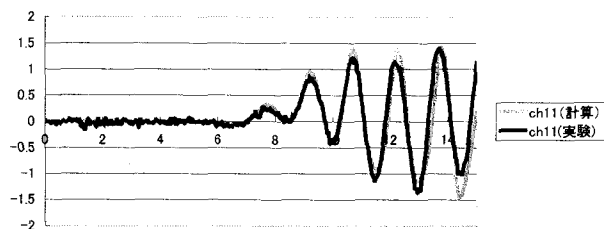
今回提案した手法は、概ね現象を再現していると言える。しかし、図-17(e)、(f)および(g)を見ると、流れ有りの場合には、実験値と計算値の整合性は悪い。放水流は、水底近くから出るために、放水口近傍の流れが鉛直に一樣ではない。したがって、ブジネスク系の方程式では、限界がある。CADMAS-SURF³⁾に代表されるVOF法などは有力な手法と考えられる。しかし、今回は平面的な広い領域を解析することを考えて、平面2次元に拡張が容易な手法を提案した。

5 結論

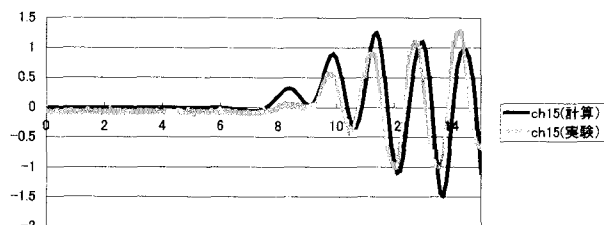
孔あきケーソンを持った放水路内の越波伝達波の特性について、実験と計算によって調べた。この現象は、入射波が流れによって変化すること、そして通過波は、周期によってその通過率が異なること、それに越波伝達波が加わることによって、複雑な現象となる。流れがある場合、越波伝達波は、周期1.5sでは流れが無い場合の2倍以上になることがある。このような、複雑な現象をケーソン部をモデル化することによって計算できる手法を示した。今回は2次元計算ではあるが、かなりの精度でこのモデルは現象を再現することができた。



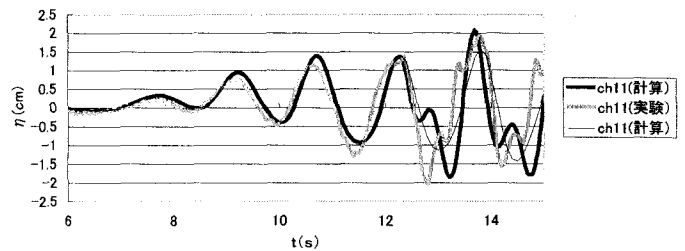
(a) 流れが無い場合のCH 10の実験と計算の水位の比較



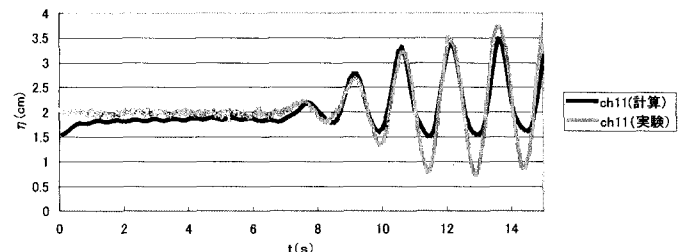
(b) 流れが無い場合のCH 11の実験と計算の水位の比較 (通過波のみ)



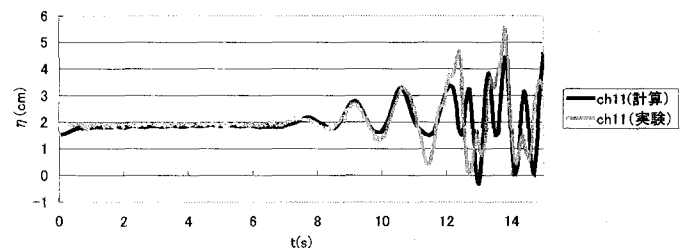
(c) 流れが無い場合のCH 15の実験と計算の水位の比較 (通過波のみ)



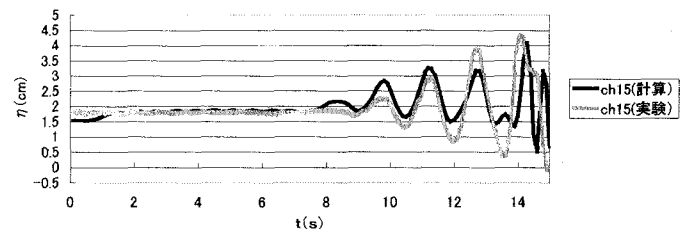
(d) 流れが無場合のCH 11の実験と計算の水位の比較 (越波有り)



(e) 流れがある場合のCH 11の実験と計算の水位の比較 (通過波のみ)



(f) 流れがある場合のCH 11の実験と計算の水位の比較 (越波有り)



(g) 流れがある場合のCH 15の実験と計算の水位の比較 (越波有り)

図-17 各条件における実験と計算との比較

参考文献

- 1) 織田幸伸・東江隆夫・灘岡和夫(1997): 運動量を考慮した越波伝達波の算定法, 海岸工学論文集, 第44巻, pp751-755
- 2) 東江隆夫・伊藤一教・織田幸伸・灘岡和夫(2000): 越波水塊による伝達波, 海岸工学論文集, 第47巻, pp716-720.
- 3) (財) 沿岸開発技術研究センター(2001): 数値波動水路の研究・開発, 沿岸開発技術ライブラリー No. 1