

護岸の裏込部への波圧伝播に関する数値計算

NUMERICAL CALCULATIONS ON WAVE PRESSURE PROPAGATION INTO BACKFILL RUBBLES OF CAISSON TYPE SEAWALL

高橋重雄¹・鈴木高二朗²・朴 佑善³

Shigeo TAKAHASHI, Kojiro SUZUKI and Woo-Sun PARK

¹正会員 工博 独立行政法人港湾空港技術研究所海洋・水工部長 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 工修 独立行政法人港湾空港技術研究所海洋・水工部主任研究官

³工博 韓国海洋研究所 (韓国 京畿道安山市)

Numerical calculations are conducted to investigate the characteristics of wave pressure propagation into backfill rubbles of caisson type seawall. The wave pressure in front of the caisson is transmitted directly into the backfill rubble mound when the backfill mound is covered by reclaimed soil. The pressure may cause so-called through-wash or liquefaction of the covering soil and consequently the settlement of the reclaimed occurs. The pressure can be reduced significantly by putting an air-pressure release opening on the top of the backfill rubble mound.

Key Words : sea wall, wave pressure, pressure release opening, backfill rubbles, caissons, permeability, through-wash, scour.

1. まえがき

護岸や岸壁の設計において、これまで波浪はあまり問題とされていなかった。それは、一つにはこうした構造物があまり波浪の厳しいところに建設されず、波浪は、土圧や地震力に比して設計外力としては比較的小さかったからである。しかしながら、海岸・港湾構造物の被災の中で護岸の被災は少なくなく、その多くが波浪によって発生する護岸背後の埋立地の吸い出しや沈下災害である。特に、こうした被災が廃棄物護岸で発生すると、大きな問題となる危険性がある。

著者らは、護岸の吸い出しや沈下に対する設計法を確立するため種々の研究を進めており^{1) 2)}、特にケーソン式護岸を対象に、そのメカニズムの解明や防止対策の確立をめざしていくつかの検討を行っている。本研究は、そうした研究の一つであり、数値計算によって波作用時の護岸周辺の圧力や流れを明らかにするものである。特に裏込部への圧力の伝播やマウンド内の流速は、地盤の波による液状化や吸い出し、そしてその結果としての沈下に大きく関連しており、十分な検討が必要と思われる。計算では、

冠水による圧力の増大や圧抜き工法による圧力の低減効果等も調べている。

数値計算は、波の場にポテンシャル理論を用い、裏込石や捨石マウンド、埋立砂そして砂地盤に Biot の多孔質弾性体理論 (2相理論, Two Phase Theory)³⁾ を適用し、有限要素法によって離散化している。計算は、二次元の周波数領域の線形計算であるが、波が作用した場合の圧力や流速、変位等を含めた波-地盤-構造物の応答が計算できる。計算法の詳細はここでは示さないが、朴ら⁴⁾にほぼ全体が示されている。

なお、著者らは数値波動水路⁵⁾と地盤の FEM プログラムの開発⁶⁾も行っており、本報告にもそうした非線形の時間領域の計算との比較も行っている。さらに、裏込部での圧力や流速を簡易に推定する方法についても、検討を行っている。

2 線形周波数領域の計算の条件

図-1 は、計算の対象としたケーソン式護岸の断面図であり、護岸は、幅 20m のケーソンの背後に裏込石を置き、埋立砂を設置したものであり、著者ら

が縮尺 1/20 として実施した水理模型実験に合わせたものである²⁾。護岸の諸元は、現地量と 1/20 の模型量で示している。

表-1 は、計算に用いた埋立砂及び裏込石とマウンド石の物性値である。なお、石の透水係数は、用いる石によって異なるが、通常模型では 0.05~0.5m/s 程度、現地では、0.2~2m/s であり、模型実験の透水係数として $k=0.1\text{m/s}$ 、現地の透水係数として $k=1\text{m/s}$ を用いている。ただし、フルードの相似則が成り立つためには模型の透水係数を現地の $(1/20)^{0.5}$ 倍 ($k=0.22\text{m/s}$) にしなければならないが、計算で用いた値はそれよりやや小さい値である。砂の透水係数は現地も模型も同じ砂を想定しており、0.001m/s である。計算で作用させた波は、現地で周期 T が 13.6s で、波高は線形計算であるので計算結果に関係ないが 10m としており、模型量では $T=3.04\text{s}$ 、 $H=50\text{cm}$ である。

表-1 計算に用いた石と砂の特性

| | 砂 | | 石 |
|-----------------------------------|---------|-----|---------|
| | 地盤 | 埋立砂 | |
| せん断弾性係数 G (tf/m ²) | 1340 | 700 | 1500 |
| ポアソン比 ν | 0.333 | | 0.333 |
| 空隙率 n | 0.445 | | 0.529 |
| 透水係数 k (m/s) | 0.001 | | 0.1/1.0 |
| 比重 | 1.9 | | 1.74 |
| 体積弾性係数 K_s (tf/m ²) | 3600000 | | 3600000 |

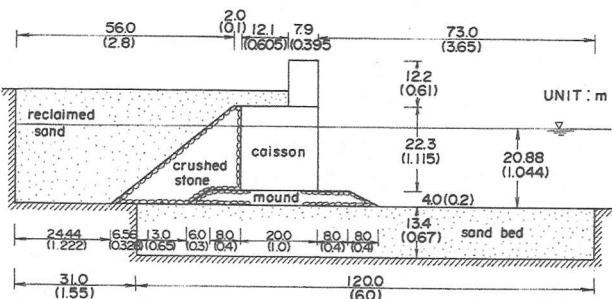


図-1 計算の対象としてケーソン護岸断面

計算を行ったケースは以下のとおりであり、計算結果は主として、波による護岸内部での圧力と流速の分布について示している。

(1) 完成断面に関する計算 (現地量)

前掲図-1 に示した標準的な完成断面に関して計算を行った。波が作用した場合の圧力や流速が分かれば、埋立砂の吸い出し等、護岸の被災のメカニズム解明に資することができる。

(2) 現地量と模型量の比較

模型量の計算を行い、現地量との違いについて検討した。先に述べたように模型量計算における石の透水係数は、フルードの相似則から考えるとやや低いがほぼ適合する値であり、こうした場合の圧力や

流速の現地と模型の対応について検討する。

(3) 冠水の影響に関する計算 (模型量)

越波や降水によって、埋立天端上が冠水すると、裏込部が密閉されたようになり、ここでの間隙水圧が上昇することが考えられる。そうした影響を計算で確かめることを目的としている。計算は模型量で行った。

(4) 圧抜き工法に関する計算 (模型量)

裏込部の圧力を低減するために、裏込部天端に圧抜き開口部を設けることが考えられる。圧抜き開口部として裏込石を埋立天端まで設けた断面について、その効果を検討した。計算は冠水がある場合も実施している。計算では、二つの開口部幅について検討している。

(5) 施工時に関する計算 (裏込石投入時) (模型量)

施工時は、防波堤のような断面やこれに裏込石が設置された断面形状となる。こうした場合の圧力や流速の伝播についても計算を行っている。施工時に防砂シートを敷設する場合、そこでの流速などが問題となるが、こうした計算結果を参考にすることができる。

3 線形周波数領域の計算結果

3.1 完成断面 (現地量) の計算結果

(1) 圧力の伝播と変位

図-2 は、現地の護岸における圧力のピーク値の分布 (各点の最大値) を示すものであり、透水係数 k は 1m/s の場合である。圧力は波高で無次元化しており、ケーソン前趾で $0.75w_0H$ 、ケーソン後趾で $0.65w_0H$ となる。裏込石内ではほぼ圧力が一定で $0.65w_0H$ とかなり大きく、ケーソン前趾の圧力の 85%程度になっている。埋立砂内では圧力が急激に低下しており、特に裏込石天端上では圧力の減衰が大きく、当然埋立天端表面では 0 となる。

裏込部の圧力は、地盤の波による液状化の原因となる。すなわち、裏込部上部の埋立土の土かぶり厚が、裏込め内部の圧力より小さければ、液状化が発生し、その結果として沈下や吸い出しに大きく関連すると考えられる。

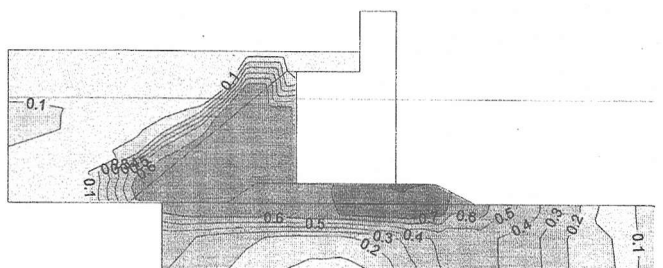


図-2 圧力の分布 (完成断面, 現地量 $k=1\text{m/s}$)

(2) マウンドと裏込部の流速

図-3は、現地の流速ベクトルの絶対値の分布を示すものであり、透水係数 $k=1\text{m/s}$ で流速を $\pi H/T$ (入射波の静水面での鉛直流速) で無次元化している。流速はマウンド内で速く、無次元流速が0.05以上となっている。例えば、波高が10mで、この無次元流速が0.05であれば、0.11m/sとなる。なお、 k が2倍の2m/sであると、圧力の分布は多少変わるもののその変化は小さいのに対し、流速は2倍となることに留意する必要がある。なお、マウンド内の流速は、基本的にはケーソン前趾と後趾の圧力差で発生しており、その圧力差を用いてダルシー則で概略値を計算できる。

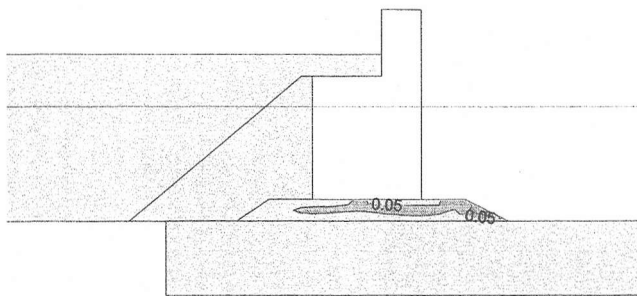


図-3 流速の分布 (完成断面, 現地量 $k=1\text{m/s}$)

(3) 透水係数の影響

図-4は、透水係数が1/10の0.1m/sとなった場合の圧力分布である。この透水係数は、現地の捨石の透水係数としてはかなり小さいが、比較のために計算を行った。 $k=1\text{m/s}$ の場合と比較して、捨石マウンド内での圧力減衰が大きく、ケーソン後趾そして裏込石内では0.25 w_0H 程度に低下している。したがって、計算において、透水係数を適切に設定することが重要であることが分かる。一方、現地の石に比較的細かい砕石を用いれば、裏込石内の圧力をかなり低下できるともいえる。

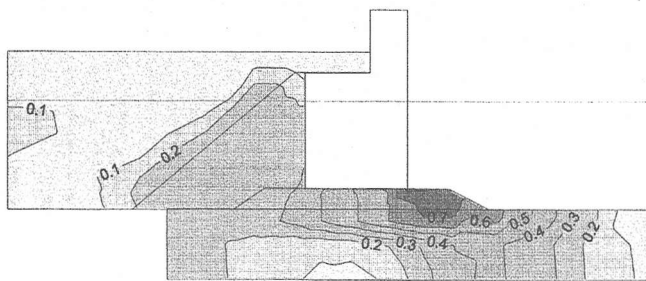


図-4 圧力の分布 (完成断面, 現地量 $k=0.1\text{m/s}$)

3.2 完成断面 (模型量) の計算結果

すでに述べたように、著者らは護岸の吸い出しに関する模型実験を行っており、その断面がほぼ図-1に示すものである。図-5は、その模型量に対する計算結果であるが、ここでの模型量の計算は、 k

$=0.1\text{m/s}$ で行っており、その模型実験における透水係数よりやや低めの値を用いている。また、この透水係数は、現地の透水係数1m/sからフルードの相似則で計算される模型の透水係数0.22m/sよりもやや小さい。

図-5は、圧力のピーク値分布であり、この計算値は、模型実験の測定値と非常によく一致している²⁾。この図を、前掲図-3の現地量の計算結果と比較すると、模型量の無次元圧力は、透水係数が小さいにもかかわらず全体的に現地量によく一致していることが分かる。ただし埋立砂内では、やや圧力減衰が模型の方が大きいようである。

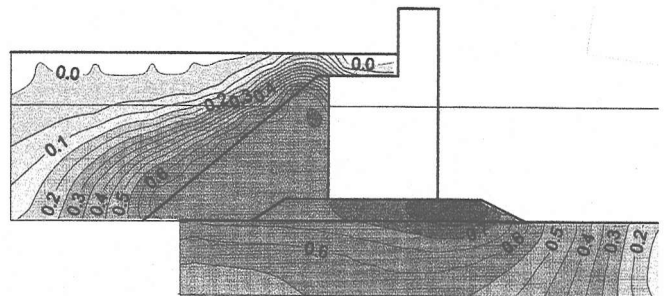


図-5 圧力の分布 (完成断面, 模型量 $k=0.1\text{m/s}$)

3.3 冠水による圧力の増加

図-6は、越波や降水により冠水した場合の圧力と流速の分布である。ただし、計算は模型量で $k=0.1\text{m/s}$ の場合について実施しており、前掲図-5と比較すると0.1 w_0H 程度大きくなっており、ケーソン前後の圧力差が無くなっていることが分かる。図には示していないが、流速分布を見ると、裏込石内ではほとんど水の動きが認められなくなっている。

すなわち、冠水によって裏込部上部の密閉度が上がり、その結果ケーソン前趾の圧力が減衰せず、ほぼそのまま裏込部に伝わっていると思われる。なお、この冠水による密閉の効果も、模型実験で確かめられている。

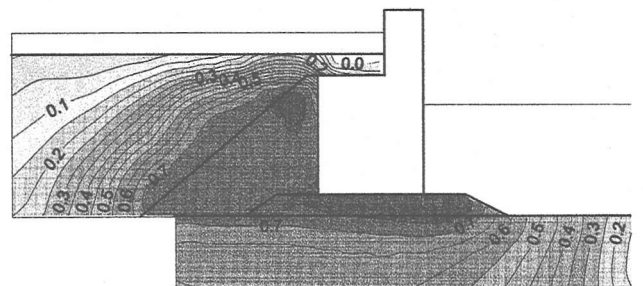


図-6 圧力分布 (冠水断面, 模型量 $k=0.1\text{m/s}$)

3.4 圧抜き工法による圧力の低減

ケーソン背後の圧力は、裏込部の密閉度が高いほど大きくなる。従って、圧力を小さくするために圧

抜き開口部を設けた計算を行った。開口部幅は、マウンド厚さと同じにしており、模型量に対する計算で、 $k=0.1\text{m/s}$ の場合である。図-7は、圧力の分布を表すものであり、図-5と比較すると、圧力が顕著に小さくなっていることが分かる。ケーソン後趾では $0.25w_0H$ 程度であり、裏込部で $0.2w_0H$ 以下、埋立砂内で $0.15w_0H$ 以下となっており、開口部に行くほど小さくなっている。

図-8は、流速の分布である。マウンド内や裏込部内に流速が認められており、流速の発生によって圧力の低減が図られていることが分かる。裏込部開口部付近の無次元流速は、0.02 以上であり、ここでの水位変動振幅（波高）が、入射波の水面変動振幅（波高）の2%程度であることが分かる。なお、ここでの水位変動が大きいと、シートの破損やそうしたところからの埋立砂の吸い出しの危険性がある。

図-9は、圧抜き開口部の大きさの影響を見るために、開口部を1/5に狭めた場合である。図-7と比較すると、全体的に圧力が大きくなっており、ケーソン後趾で $0.5w_0H$ 程度、裏込部で $0.4w_0H$ 以下と約2倍以上になっている。やはり、圧抜き開口部の大きさが圧抜き効果に影響していることが分かる。

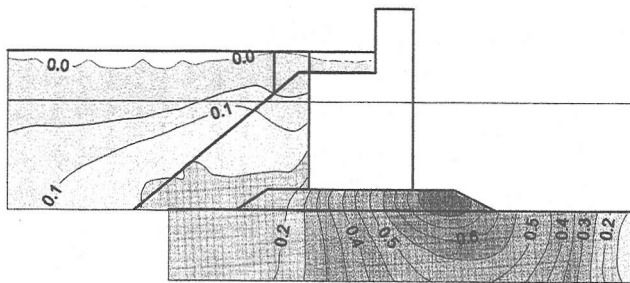


図-7 圧力分布（圧抜き幅4m，現地量 $k=1\text{m/s}$ ）

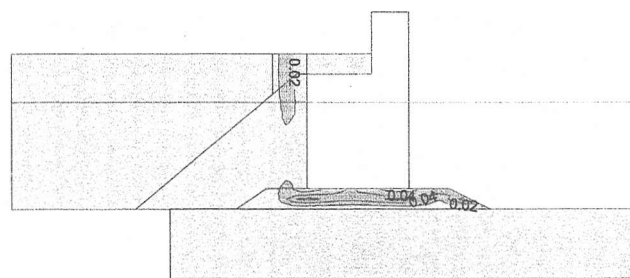


図-8 流速分布（圧抜き幅4m，現地量 $k=1\text{m/s}$ ）

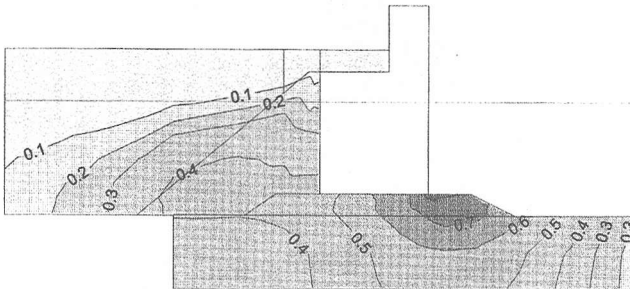


図-9 圧力分布（圧抜き幅0.8m）

3.5 施工時の計算結果

図-10は、裏込石が投入された時を対象にしており、 $k=1\text{m/s}$ で現地量の場合の無次元圧力分布である。見方を変えれば、このケースは圧抜き開口部を最大限にあけた場合であり、圧力を開口部によって最大限低減させれば、裏込部の圧力はほとんど0となり、ケーソン後趾で $0.15w_0H$ 程度の圧力が残ることになる。

図には示していないが、裏込石投入時の無次元流速は、完成護岸断面の約2倍程度であり、圧抜き部がある場合よりさらに大きい。

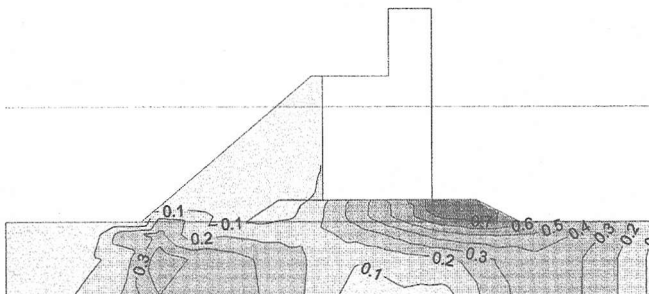


図-10 圧力分布（裏込投入時，模型量 $k=0.1\text{m/s}$ ）

4. 数値波動水路とFEMによる計算

図-11は、数値波動水路⁵⁾と地盤のFEM解析プログラムを連携させたプログラム⁶⁾による計算結果の一例である。波高8m，周期13.6s，水深20.88mの条件で、碎石の透水係数を 1m/s として計算している。ケーソン前面では有限振幅波の圧力分布が精度良く再現されている。一方、ケーソン下部から裏込石にかけては圧力がほとんど同じ大きさであり、ケーソン前趾の圧力となっており、埋立砂で圧力が急激に減衰しているのが分かる。この結果は周波数領域の計算結果図-2の圧力分布と非常によく一致している。

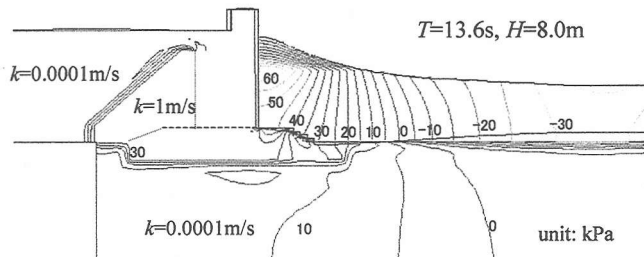


図-11 VOF-FEMによる計算例（現地量 $k=1\text{m/s}$ ）

なお、本計算法ではマウンドや裏込部を地盤の一部として取り扱っているが、これらを消波ブロックなどと同じように空隙率とその抵抗（慣性力や抗力）を考慮した水部として取り扱うことも可能であり、慣性力係数や効力係数の取り方を適切に取れば、ほぼ同じような解を得ることができる。

5. 裏込部周辺の圧力と流速の簡易計算法

(1) 開口部による圧力の低減効果

裏込部周辺の圧力と流速は、ダルシー則を基に簡易に計算できる。図-12 はケーソンとマウンドそして裏込部のモデル化を示すものである。このモデルは、以下の5つの式からなる。

$$\text{裏込部水位と圧力： } p_3 = \rho g \eta \quad (1)$$

$$\text{マウンド流速： } u_1 = k_1(p_0 - p_2)/l_1 g \quad (2)$$

$$\text{裏込流速： } u_2 = k_2(p_2 - p_3)/l_2 g \quad (3)$$

$$\text{裏込での水位変化： } d\eta/dt = u_2 \quad (4)$$

$$\text{流量の保存： } r_0 u_1 = r_3 u_2 \quad (5)$$

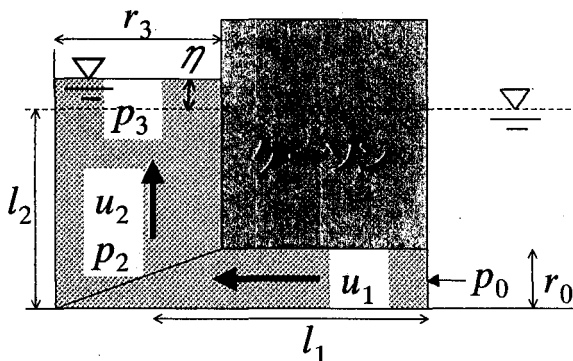


図-12 開口部の圧力と流速の減衰モデル

ここで、以下のように p_0 , η を表す。また、 p_0^* , η^* は振幅であり、 ω , t , δ はそれぞれ角周波数、時刻、圧力に対する水面変位の位相のずれである。

$$p_0 = p_0^* \sin(\omega t) \quad (6)$$

$$\eta = \eta^* \sin(\omega t + \delta) \quad (7)$$

したがって、 p_3^*/p_0^* は以下の式で表される。

$$p_3^*/p_0^* = 1/(1 + (l_2/k_2 + l_1 r_3/k_1 r_0)^2 \omega^2)^{0.5} \quad (8)$$

$$\cong 1/((l_2/k_2 + l_1 r_3/k_1 r_0) \omega) \quad (9)$$

$$\delta = \tan^{-1}((l_2/k_2 + l_1 r_3/k_1 r_0) \omega) \quad (10)$$

たとえば、 $l_1=21\text{m}$ $l_2=24.3\text{m}$ $r_0=4\text{m}$ $r_3=4\text{m}$ で $k_1 = k_2 = 1\text{m/s}$, $\omega = 2\pi/13.6\text{s}$ とすると、 $p_3^*/p_0^* = 0.05$ となる。このとき $p_0^*/\rho g = 7.5\text{m}$ であるとすると $u_1 = u_2 = 16\text{cm/s}$ である。また、開口部が $1/5$ となると $p_3^*/p_0^* = 0.076$ となり、当然だ

が、開口率が0となると $p_3^*/p_0^* = 1.0$ となる。いずれも実験結果にほぼ対応しているが、この計算法は、簡易のものであり、更に検討が必要である。

(2) 埋立砂内の圧力減衰

埋立砂内では、間隙水圧は急激に減衰すると考えられる。図-13 は、Biot の二相弾性体の理論⁷⁾ によって計算された間隙水圧の線形減衰率 k_2 である。すなわち、間隙水圧 p は、初期圧力 p_0 、減衰距離を z として

$$p = p_0 \cdot \text{EXP}[-k_2 z] \quad (11)$$

と表される。ただし、この減衰係数は、砂の透水係数と飽和度、そして波の周期の関数である。これは、無限深さの海底砂地盤上に波が進行する場合に対する砂地盤中の間隙水圧の線形減衰率であり、必ずしも埋立砂内の間隙水圧の伝播とは同じではないが、参考にすることができる⁷⁾。 k_2 は、間隙水圧の伝播に関係する遅い圧縮波 (Slow Compression Wave) の複素波数の虚数部であるが、図ではこれを波の波数 k_w との比で示しており、飽和度 100% として、 $T=13.6\text{s}$ の波に対して模型の場合と現地の場合について計算している。

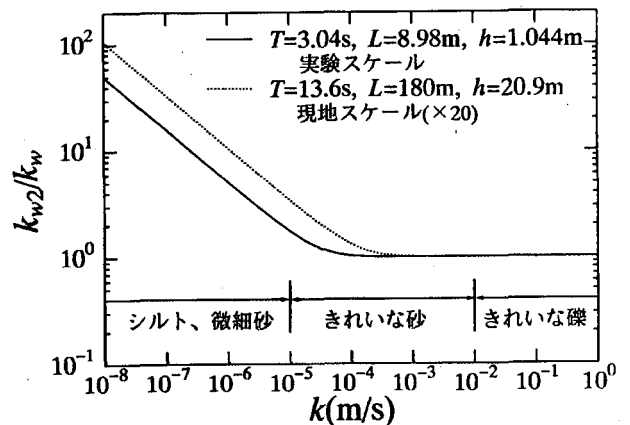


図-13 埋立砂内部の圧力減衰

例えば、透水係数が 10^{-3}m/s であれば、 k_2/k_w は現地でも模型でも 1.0 であり、波の波長を L とすると、 $z=0.25L$ で圧力が 20% まで小さくなる。この場合は、現地と模型がフルードの相似則を満たすことになる。一方、透水係数が細砂やシルトの場合の 10^{-6}m/s であれば、 k_2/k_w はやや大きくなり、模型と現地でやや異なっている。すなわち k_2/k_w が現地では 10 であるので、1.0 の場合の $1/10$ の距離で同じ減衰が起こると考えられる。模型では k_2/k_w が 6 程度であり、現地に比して減衰が約 $1/2$ となる

ことがわかる。

6. まとめ

本報告の主要な結論は以下のとおりである。

1) 線形周波数領域の波・地盤の数値計算法を用いて、ケーソン護岸に作用する波について計算を行った。

計算結果から得られた、波の作用による護岸内の圧力や流速の特徴は以下のとおりである。

①完成時の護岸断面では、透水係数を 1m/s とすると裏込石内の圧力は、ケーソン前面の圧力の約 85% であった。このとき、マウンド内の無次元流速 $u/(\pi H/T)$ は 0.05 程度である。

②越波や降水によって裏込部の密閉度が高くなると裏込部の圧力は大きくなり、マウンド内の流速は小さくなる。

③圧抜き開口部を裏込部天端に設けることによって、圧力をかなり低下することができる。ただし、開口部幅を小さくすると、その効果は低減する。

2) 数値波動水路

数値波動水路と地盤の FEM プログラムを連携させることでも、裏込部等への圧力の伝播が計算できる。この方法では、波の非線形性も考慮できより正確な評価が可能であるが、さらに検証が必要である。

3) 簡易計算法

裏込部等の圧力や流速の簡易計算法を示した。この計算法では、圧抜き工による圧力の低減や埋立砂内の圧力の減衰を概略ではあるが簡単に示すことができる。

謝辞： 数値波動水路による計算は、数値波動水路の耐波設計への適用性に関する研究会（委員長：磯部雅彦東大教授）⁵⁾の開発したCADMAS-SURFを用いている。

参考文献

- 1) 高橋重雄・下迫健一郎・山本 悟・善 功企・山崎浩之：ケーソン式護岸背後の沈下災害に関する一実験，海洋開発論文集，Vol.10，pp.201-206，1994.
- 2) 高橋重雄・鈴木高二朗・徳淵克正・岡村知光・下迫健一郎・善 功企・山崎浩之：護岸の吸い出しに関する水理模型実験，港研報告，第35巻2号，pp.3-64，1996.
- 3) 上部達生・守屋正平：砂地盤上の大水深混成式防波堤の大型模型振動実験と地震応答解析，港湾技研資料，No.589，61p.，1987.
- 4) 朴 佑善・高橋重雄・鈴木高二朗・姜 閔求：波-地盤-構造物の相互作用に関する有限要素解析，海岸工学論文集，第43巻，pp.1036-1040，1996.
- 5) 沿岸開発技術研究センター：数値波動水路の研究開発-数値波動水路の耐波設計への適用性に関する研究会報告書-，沿岸開発技術ライブラリーNo.12，296p.，2001.
- 6) 蔣 勤・高橋重雄・村西佳美・磯部雅彦：波・地盤・構造物の相互作用に関するVOR-FEM予測モデルの開発，海岸工学論文集，第47巻，pp.51-55，2000.
- 7) Yamamoto, T. and Takahashi, S. : Wave damping by soil motion, ASCE, WW, Vol. 111, No. 1, pp.62-77, 1985.
- 8) 運輸省港湾局：管理型廃棄物埋立護岸 設計・施工・管理マニュアル，（財）港湾空間高度化センター，96p.，2000.