

格子網工法に関する基礎的研究

FUNDAMENTAL STUDY ON LATTICE GRID FOUNDATION WORKS

石倉建治¹・石倉理彦¹・田中亘¹・田畑成喜¹・水野雄三²・西隆一郎³

Kenji ISHIKURA, Michihiko ISHIKURA, Wataru TANAKA, Shigeki TABATA, Yuzou MIZUNO and Ryuichiro NISHI

¹正会員 創建工業株式会社 (〒069-0210 北海道空知郡南幌町南10線西14番地)

²正会員 北海道工業大学教授 社会基盤工学科 (〒006-8585 北海道札幌市手稲区前田7条15丁目4-1)

³正会員 鹿児島大学助教授 工学部海洋土木工学科 (〒890-0065 鹿児島県鹿児島市郡元1丁目21-40)

“Lattice grid foundation” was developed as new shore protection works. The main concern of this technique is reducing settlement due to undermining of structure and scattering of concrete armor blocks. Prediction of the settlement is important for designing shore protection facilities. Therefore, settlement of detached breakwaters and revetment in Hokkaido and Kagoshima had been measured. In addition, laboratory experiment had been conducted to clarify the characteristics of settlement of lattice grid foundation and other shore protection works. Then, empirical equations to estimate settlements of lattice grid foundation in field and laboratory were developed. The workability was also studied compared to other method.

From the field observation and laboratory experiments, the settlement of lattice grid foundation increased rapidly at the beginning of installation, and then gradually becomes slow. It finally reaches to near-equilibrium condition. The empirical equation estimating settlement of the structure can be applicable for future shore protection project.

Key words : *Lattice grid foundation, Shore protection facilities, Prediction of the settlement of hard structures*

1. まえがき

現在、我が国の海岸には、越波および侵食などを防ぐために消波ブロックを使用した離岸堤や消波堤などの構造物が多数設置されている。(新)海岸法の下ではソフトストラクチャーと呼ばれる養浜も採用されるようになったとはいえ、消波ブロックを用いたハードストラクチャーが依然として、我が国の海岸保全工法の主流である。したがって、これまでに築造した海岸保全構造物あるいはこれから築造する保全構造物の維持管理は重要な問題である。また、公共工事予算が減り続ける現状では、当然ながら維持管理の手間が少なく、実質的に寿命の長い保全構造物の開発が望まれる。一方、既存の保全構造物では構造物沖側部分から波浪による洗掘・砂の吸出しを受け、しかも、割石や消波ブロックが散乱してしまい天端の低下や不等沈下を生じる事例がある(写真-1参照)。そのため、防護機能が著しく低下している施設も少なくはない。また、防護機能の低下以外にも景観の悪化や割石が周辺の海底に散乱し魚網を破るという水産業への悪影響、環境・利用面に対しても問題が生じている。

既存の保全構造物で生じることの多い割石や消波ブロックの散乱を防止すること、および保全構造物接地面での圧力を分散化させることで、結果として天端高の低下を抑制しようと開発されたのが格子網工法である(図-1, 図-2参照)。



写真-1 離岸堤の沈下状況

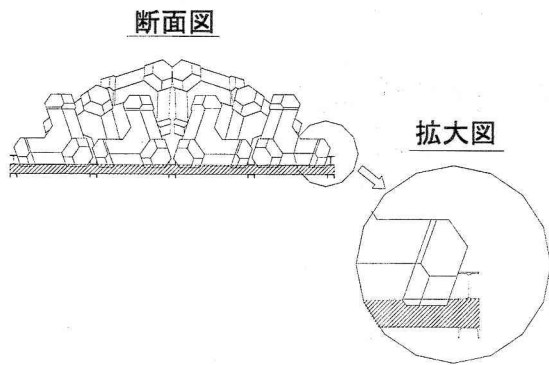


図-1 格子網工法



図-2 ブロックをはめこむ様子

これまで、格子網を用いた海岸保全構造物の設計で、沈下量の予測は既存の施工事例を参考に経験則的な判断で行っていた。しかし、海岸保全施設の設計で天端高は施設性能に大きく影響を与えることから、定量的な沈下量の予測が重要である。したがって、格子網を用いた海岸保全施設の沈下量および沈下特性を現地調査および模型実験に基づき検証した。そして、今後の現場施工で沈下量予測ができるように、既往の現地および室内実験の沈下量データから、沈下量予測式を開発した。また、既存工法との沈下特性の相違を調べるための模型実験、および現場施工性の検証も行った。

2. 格子網工法の施工法および施工例

(1) 格子網の現場施工法

格子網工法の施工法は図-3 に示すとおりで、①格子網部材現場搬入、②格子網組み立て、③格子網据付基面整理、④格子網据付、⑤ブロック（割石）据付、⑥ブロック（割石）据付、⑥完成の流れとなっている。施工中、砂面に敷設する格子網で水平面が確保されるので、ブロックの設置作業がスムーズである。また、格子網の4辺部は消波ブロックが滑動しない工夫が施され、結果としてブロックのかみ合せが確保されるようになっている。

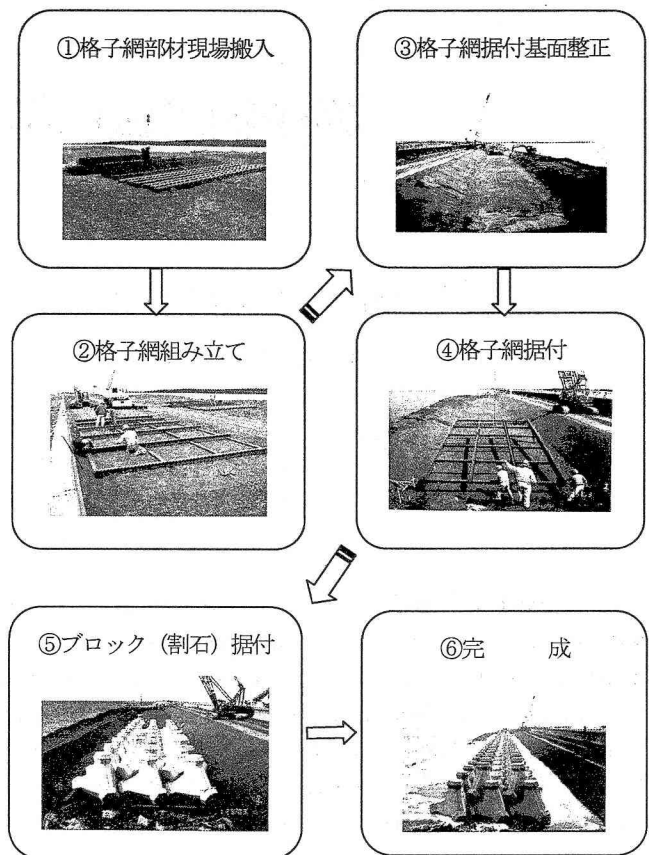


図-3 格子網施工フロー

(2) 格子網の施工例

a) 格子網の施工実績

北海道での格子網の施工実績は、図-4 に示すとおりである。

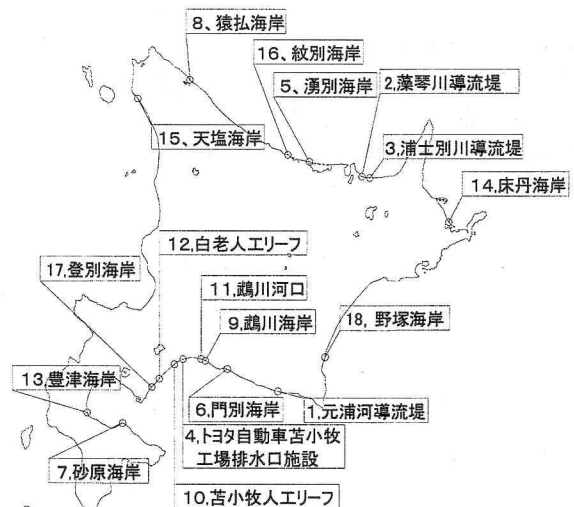


図-4 格子網施工実績地図（北海道）

b) 格子網の施工性

格子網の施工性に関しては、1例として、北海道根室支庁管内床丹海岸を取りあげると、4.72m（高さ）×78.01m（沿岸延長）×13.72m（岸沖幅）の離岸堤で、8.36m（沿岸長）×6.86m（岸沖幅）の格子網18基と5.55

m (沿岸延長) × 6.86m (岸沖幅) の格子網 4 基を設置し、これらの格子網上に、総計 985 個の 5 トンブロックをクレーンで吊上げ・据付し離岸堤を築造した。格子網の敷設には実働総時間で 7 時間 1 基当たり 19 分、ブロック据付には全個数 985 個で 10 日かかり、1 個当りの据付時間は 3 分 45 秒となった。土木工事積算基準¹⁾によると 5 t ブロック層積み据付の場合は、日当り 49 個程度が限界となる。1 個当り据付時間に換算すると 8 分の結果となり、格子網工法よりも 2 倍の労力を要することがわかった。これは、予め敷設しようとするブロック諸元から格子網の升目の寸法を設計することで、現地でブロックの芯出しや法線の設定などの作業工程が簡略化されたことが施工性を向上させた要因と思われる。図-5 は格子網と従来工法の作業フローを示している。この図からも作業工程が 1 つ減ることが明らかである。このように工程を簡略化すれば工期と工費の節減に結びつく。

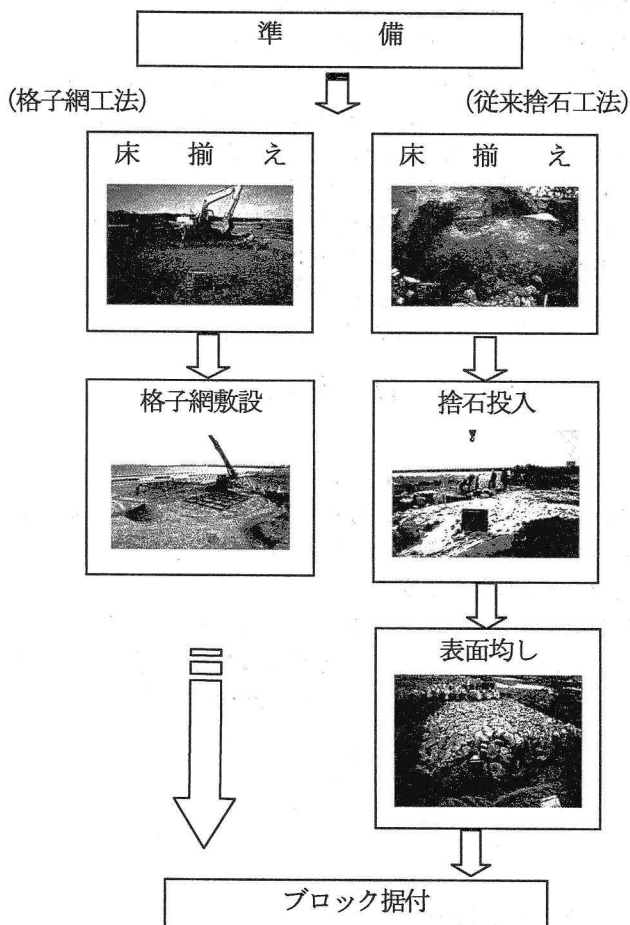


図-5 基礎施工フロー

3. 現地調査とデータ解析

(1) 調査位置および調査方法

a) 調査位置

格子網の沈下量について現地調査した箇所は、図-6 で示すように北海道湧別海岸消波堤、床丹海岸離岸堤および鹿児島県柏原海岸消波工の 3 箇所である。

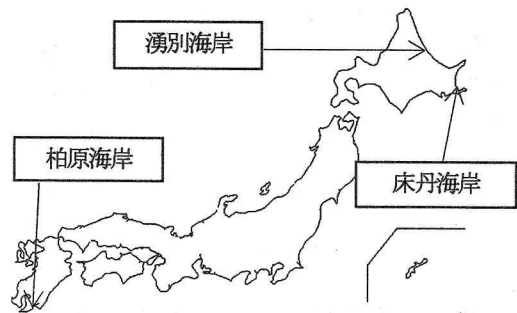


図-6 調査位置

b) 調査方法

現地調査は施工時からの天端高の経年変化を定点観測した。計測時間間隔は任意ではあるが約 3 ヶ月を基本として、スタジア測量にて計測した。計測点は図-7 に示すとおり天端の沖側と陸側をそれぞれ計測した。施設および調査の概要は表-1 に示すとおりである。

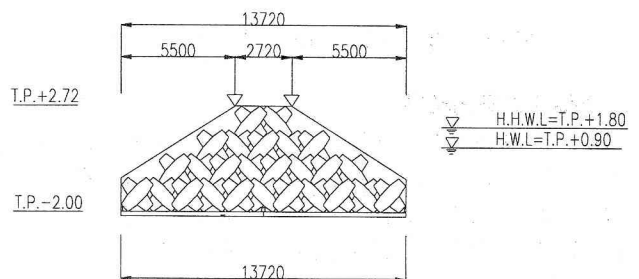


図-7 床丹海岸離岸堤計測位置

表-1 施設概要および調査概要

現場区分名	計測期間	設計天端高(m)	施設延長(m)	測点数
湧別 1	1993/9/10～ 1995/3/13	T.P.+4.10	14.0	3
湧別 2	1993/9/10～ 1995/4/17	T.P.+3.60	96.0 127.0	11 14
床丹 1	2002/5/28～ 2004/5/18	T.P.+3.60	103.3 77.8	8 5
床丹 2	2003/6/24～ 2004/5/19	T.P.+3.60	75.82	5 5
柏原	2003/11/7～ 2004/11/25	T.P.+1.90 T.P.+2.28	20.0	2 2

(2) 調査結果

a) 堤体延長方向の天端挙動²⁾

図-8、図-9 は湧別海岸消波堤における延長方向の天端挙動を示す。図-8 は延長 14.0m の場合、図-9 は延長 96.0m の場合を示している。図を見ると消波堤 1 基が長い場合、格子網基礎においては中央部の天端挙動が著しい。短い場合は延長方向に一樣な天端挙動がみられた。

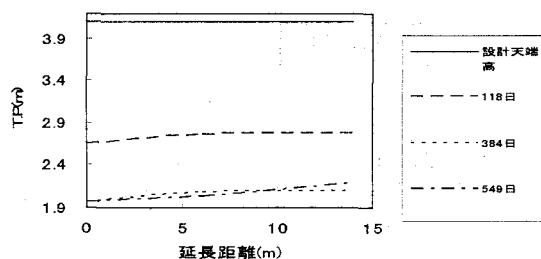


図-8 湧別海岸 14.0m 区間の天端挙動

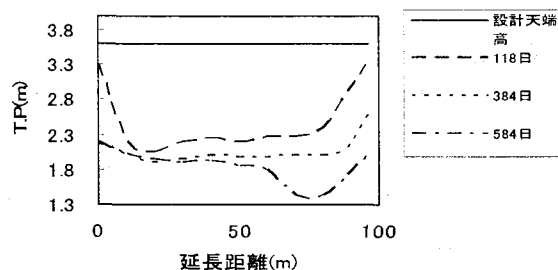


図-9 湧別海岸 96.0m 区間の天端挙動

b) 各海岸の実測結果

図-10 は各現場の時間と沈下量との関係を示したものである。沈下量は正の値とし、現場区分毎の計測値を平均したものである。図より、施工後約半年間は急速に沈下が進み、その後、沈下が減少、収束する傾向がみられる。湧別1は549日で1.96m、湧別2は584日で2.12m、床丹1は689日で0.84m、床丹2は330日で1.09m、柏原は453日で0.20mの沈下がみられた。

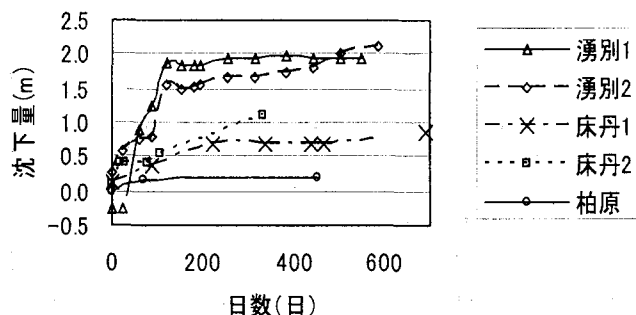


図-10 時間と沈下量との関係

なお、現場における沈下量の判定は天端高の計測だけに基づいている。したがって、構造物自体が砂面の中に沈下する場合と、構造物を設置している砂面が漂砂現象により低下し、同時に構造物天端が低下する場合がある。湧別海岸はカスプのbay部分に設置されたために後者の機構が卓越したものと考えられる。

柏原海岸においては、2004年に多くの台風が上陸し、最大有義波高9.3mの波が入射したにもかかわらず、ほとんど沈下はみられなかった。

(3) 予測沈下量の算定

a) 無次元沈下量式の設定

構造物天端の沈下は初期段階で急速に進行し、その後、時間の経過とともに徐々に減少かつ収束する傾向がみられる。現場でのこの様な沈下量と時間の関係を表すには、現状では指数関数が適当と判断し、(1)式を用いることにした。また、図-10に示されるように沈下量の絶対値は現場毎に異なる。さらに、後で示す水理実験データとの整合性もできるだけ確保したい。そこで、沈下量を初期天端高で割ったパラメーターを用いることにした。このパラメーターを用いれば、必要な天端高に対して現況がどの程度確保されているのかが分かるので、メンテナンスの指標としても使いやすい。なお、構造物天端の沈下は時間的に進行するので、一見時間を横軸にとるべきようにも思えるが、構造物に波による外力が何回作用するかが実質的に重要である。そこで、構造物に作用する波数を時間に代わる独立変数とする。当然であるが、波数が増えることは時間の増加を意味する。ただし、現場海域に波高計を設置しているわけではないので、波数パラメーターは近傍の波浪観測地点での入射波の代表周期(sec)で施工後の経過時間(sec)を割ることで求めた。ここで、入射波周期は波浪観測地点での日平均波を集計し、年平均波周期を算定したものである。湧別海岸は紋別港($T_i=4.5\text{sec}$)、床丹海岸は十勝港($T_i=5.7\text{sec}$)、柏原海岸では志布志($T_i=5.8\text{sec}$)の波浪観測データを使用した。以上のことをふまえ、モデル式は式(1)と設定した。

$$Bs/hc = Hci \cdot (1 - e^{-ax}) \quad (1)$$

ここで、 Bs : 沈下量(m)、 hc : 設計天端高 [TP] (m) (Bs/hc : 無次元沈下量)、 Hci : 収束無次元沈下量、 a : 波数尺度係数、 x : 波数 (=時間(sec)/周期(sec)) とする。

b) Hci および a の算定

回帰分析をするために、モデル式(式(1))の逆関数を取り、実測の Bs/hc より仮想経過波数 x を算定し、 x とで回帰分析を行った。これより、 Hci および a を求めた。

$$x' = \frac{\ln \left(1 - \frac{Bs/hc}{Hci} \right)}{a} \quad (2)$$

c) モデル式算定結果

表-2は各現場区分の入射波高、周期およびモデル式算定結果を示している。

表をみると、湧別海岸の収束無次元沈下量は平均的に床丹海岸よりも大きいことが分かる。現地踏査の結果では湧別海岸は床丹海岸よりも侵食の激しい海岸であると考えられ、構造物天端の沈下は設置海域の海底面自体が低下することにも起因した相違が生じているようである。また、湧別海岸の底質粒径は床丹海岸のものに比べて大きく、現地ではより波高の大きい波が打ち寄せている可能性もある。

表-2 入射波高, 周期およびモデル式算定結果

調査位置	収束無次元沈下量	波数尺度係数	調査位置の条件		
			波高	周期	底質粒径
	Hci	a	H(m)	T(sec)	d ₅₀ (mm)
湧別1	0.483	-5.90e ⁻⁷	0.81	4.5	0.440
湧別2	0.603	-1.97e ⁻⁷	0.81	4.5	0.440
床丹1	0.271	-2.69e ⁻⁷	0.79	5.7	0.237
床丹2	0.370	-4.26e ⁻⁷	0.79	5.7	0.237
柏原	0.199	-3.84e ⁻⁵	0.77	5.8	

図-11には, 構造物天端の無次元沈下量の実測値と前述の最小二乗法により求めた推定値を示す. 図中, データのばらつきはあるが, 相関係数は0.73から0.96の範囲にありおおむね良好と言える. よって, (1) 式を用いる妥当性がある程度示されたことになる.

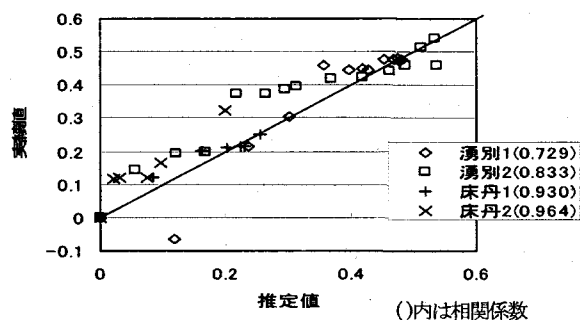


図-11 無次元沈下量の実測値と推定値の比較

4. 水理実験

(1) 実験概要

水理実験は北海道工業大学水理海岸実験室二次元造波水路(長さ24.0m, 幅0.6m, 深さ0.99m)を用いて行った. 海底勾配は1/30, 実験上の想定縮尺を1/25とし, 底質は珪砂8号(中央粒径 $d_{50}=0.10\text{mm}$, 土粒子の密度 $\rho_s=2.589\text{g/cm}^3$)を使用した. 堤体条件はテトラポッドを使用し, ブロック1個当たりの高さ7.2cm(天端高 $h_c=10.6\text{cm}$)と, 高さ8.5cm(天端高 $h_c=12.3\text{cm}$)の2種類を2層積みに行なった.

波浪条件は入射波周期 $T_i=1.4, 2.0, 2.6\text{sec}$ の3種類, 堤体法先(沖側)水深 $h=0.0, 2.5, 5.0\text{cm}$ の3種類とした.

なお, 波高は砂村・堀川の式(3)³⁾より, 侵食型の条件を満たす入射波高 $H_i=8.0, 9.0, 10.0, 12.0, 14.0\text{cm}$ の5種類とした.

$$\frac{H_0}{L_0} > C \cdot (\tan \theta)^{-0.27} \cdot \left(\frac{d_{50}}{L_0} \right)^{0.67} \quad (3)$$

ここで, H_0 : 沖波波高, L_0 : 沖波波長, C : 無次元定数($=7$), $\tan \theta$: 海底勾配, d_{50} : 底質の中央粒径である.

沈下量の計測箇所はブロック1層目を各々計測し, 計測時間は0, 1,000, 3,000, 6,000, 10,000secとした.

また, 実験では他工法との沈下比較を行った. 他工法として採用したのは①基礎なし, ②捨石基礎, ③マット基礎である.

(2) 実験結果

a) 他工法との沈下比較

図-12は格子網基礎と他工法との沈下特性の一例で, 実験条件($H_i=10.0\text{cm}$, $T_i=2.6\text{sec}$, $h=5.0\text{cm}$)のものである. この実験条件では, 格子網基礎を用いた構造物の沈下が最も少ないことがわかる.

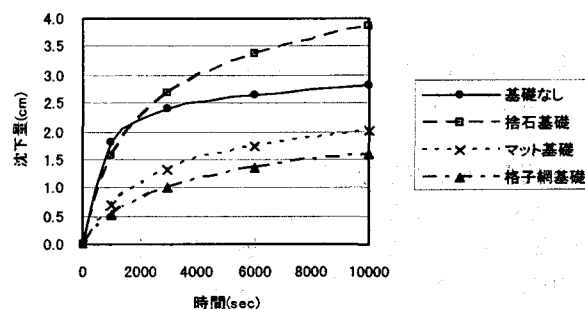


図-12 格子網基礎と他工法との比較

b) 格子網基礎の沈下量実測データおよび沈下特性

表-3は実験の沈下量実測データを示し, その中から実験条件($H_i=10.0\text{cm}$, $h=5.0\text{cm}$)の沈下状況を図-13に示す.

表-3 実験の沈下量実測結果表

	入射波高	入射周期	法先水深	沈下量 Bs(cm)			
	H _i (cm)	T _i (sec)	h(cm)	1000 sec	3000 sec	6000 sec	10000 sec
1	10.0	2.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.3
2	10.0	2.0	2.5	0.1	0.7	1.1	1.4
3	12.0	2.6	2.5	1.1	2.0	2.5	3.0
4	8.0	1.4	5.0	0.3	0.9	1.3	1.6
5	10.0	1.4	5.0	0.3	0.8	1.4	1.7
6	12.0	1.4	5.0	1.6	2.5	3.3	3.4
7	8.0	2.0	5.0	0.2	0.5	0.7	0.9
8	9.0	2.0	5.0	0.3	0.7	1.1	1.2
9	10.0	2.0	5.0	0.4	0.8	1.1	1.3
10	12.0	2.0	5.0	1.8	2.7	2.9	3.0
11	8.0	2.6	5.0	0.3	0.8	1.1	1.4
12	10.0	2.6	5.0	0.5	0.9	1.2	1.5
13	12.0	2.6	5.0	2.2	2.9	3.4	3.5
14	14.0	2.6	5.0	2.3	3.0	3.5	3.6

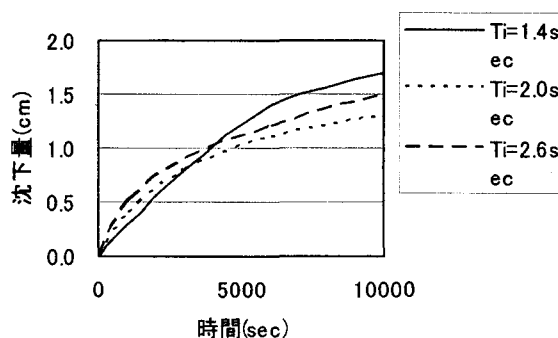


図-13 沈下量と時間との関係($H_i=10.0\text{cm}$, $h=5.0\text{cm}$)

図より、現地観測結果と同様に水理実験でも時間経過とともに沈下が減少、収束する傾向が見られる。

(3) 予測無次元沈下量の算定

水理実験結果に対して、3. (3) で示した手法と同様の方法で実験式を求めることにした。表-4 に入射波高、入射波周期、法先水深およびモデル式の算定結果を示す。

表-4 入射波高、周期、法先水深およびモデル式算定結果

	入射波高	入射波周期	法先水深	収束無次元沈下量	波数尺度係数	相関係数
	$H_i(\text{cm})$	$T_i(\text{sec})$	$h(\text{cm})$	H_{ci}	a	
1	10.0	2.0	0.0	0.0366	-0.000290	0.974
2	10.0	2.0	2.5	0.170	-0.000300	0.994
3	12.0	2.6	2.5	0.221	-0.000706	0.995
4	8.0	1.4	5.0	0.160	-0.000348	0.999
5	10.0	1.4	5.0	0.174	-0.000330	0.997
6	12.0	1.4	5.0	0.234	-0.000758	0.996
7	8.0	2.0	5.0	0.0924	-0.000447	0.995
8	9.0	2.0	5.0	0.125	-0.000561	0.997
9	10.0	2.0	5.0	0.140	-0.000454	0.997
10	12.0	2.0	5.0	0.210	-0.00103	0.971
11	8.0	2.6	5.0	0.147	-0.000558	0.999
12	10.0	2.6	5.0	0.149	-0.000667	0.981
13	12.0	2.6	5.0	0.243	-0.00132	0.990
14	14.0	2.6	5.0	0.248	-0.00160	0.994

水理実験に用いた条件では、表-4の結果より波高が大きくなることによって、収束無次元沈下量も大きくなる。また、法先水深が大きくなることによって、収束無次元沈下量も大きくなるのがわかった。さらに、相関係数をみると、モデル式は概ね良好である。

ここで、現地のモデル式と比較すると、収束無次元沈下量と波数尺度係数ともに現地の方が大きい値を示した。つまり、平均的には現地の方が沈下の生じ方が早いことになり、今後、現地の地盤特性なども考慮する必要がある。

5. 結論

海岸保全構造物の天端高沈下に関する本研究では、主に以下の結論を得た。

(1) 格子網工法では、ブロック諸元から格子網の升目の寸法を設計することで、現地でブロックの芯出しや法線の設定などの作業工程が簡略化されたことが施工性を向上させた要因と思われる。また、格子網と従来型の作業フローから、作業工程が1つ減ることにより、全体としての施工時間が短縮されることも明らかになった。

(2) 現地調査および水理実験結果より、格子網工法の沈下は時間が経過するにつれ徐々に減少し最終的に収束する傾向が見られた。

(3) 現地調査結果から、湧別海岸では堤体延長が長い場合には堤体中央部の天端高沈下挙動が著しく、堤体延長が短い場合には延長方向に一樣な状態で全体的に沈下する傾向があった。

(4) 水理実験において、基礎なし、捨石基礎、マット基礎と格子網基礎とで構造物天端の沈下量を計測したところ、格子網基礎によるものの沈下量が最も少なかった。

(5) 沈下量予測モデル式 現地調査および水理実験における沈下挙動を表すために開発した沈下量予測モデルは、概ね相関係数も高く、今後の沈下量予測に有効である。

(6) モデル式の算定結果より、現地は収束無次元沈下量と波数尺度係数が実験値より大きい値を示した。ただし、本研究ではこの原因を明確にすることはできなかった。

なお、今後は設置海域の侵食傾向と関連する海底地盤高の低下傾向や、底質粒径および海底勾配などとの関連性も検討していきたい。また、本研究では設置海域に直接波高計を設置して外力条件を計っているわけではないので、現場海域での波浪観測も必要である。

謝辞：本論文を作成するにあたりご指導を頂いた北海道東海大学工学部海洋環境学科竹田英章教授、また、関連データの取得などご協力を頂いた北海道網走支庁農業振興部、北海道根室支庁農業振興部、鹿児島県土木部、独立法人港湾空港技術研究所および国土交通省九州地方整備局志布志港湾事務所に紙面を借りて謝意を表する次第です。

参考文献

- 1) 財団法人建設物価調査会；土木工事積算マニュアル（平成15年度版），p. p. 399-425
- 2) 豊島修・坂本忠彦(1972)；離岸堤の沈下について，海岸工学論文集，第19巻，p. p. 71-75
- 3) 土木学会；水理公式集（平成11年度版），p. p. 507-509