

複断面緩傾斜護岸の断面変形に関する研究

STUDY ON DEFORMATION OF A GENTLE SLOPE TYPE DIKE WITH A STEP

伊藤一教¹・織田幸伸¹・東江隆夫²

Kazunori ITOH, Yukinobu ODA and Takao TOUE

¹正会員 工修 大成建設(株) 技術センター (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

²正会員 M.S. 大成建設(株) 技術センター (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

This study investigated deformation of a gentle slope type dike with a step. Stability of armor stones and armor blocks is investigated by hydraulic model tests. Some basic experimental results showed that a sliding of armor blocks occurred due to deformation of a step which was covered by armor stones. To find out the countermeasures, some experiments using armor blocks instead of armor stones were carried out. The experimental results indicated that a filter layer under the armor blocks reduces the lift force which acts to armor blocks. The results were in agreement with Van der Meer's study. A numerical simulation that focused on the deformation of armor stones at a step was also carried out. The simulation methods are DEM and CADMAS-SURF. The simulation indicated the processes of deformation of armor stones. The results had good agreement with experimental results.

Key Words : *gentle slope type dike, deformation, stability, armor stone, armor block, step, filter layer, simulation, DEM, CADMAS-SURF*

1. 緒言

小段を有する複断面緩傾斜護岸は、礫間接触作用などの水質浄化作用が期待でき、小段部には藻場などを提供できる。この場合、小段部で採光可能な浅い水深にする必要があり、小段部が高波の碎波帯となるため構造安定性を十分検討する必要がある。一方、緩傾斜護岸は高波や地震により被災しても、構造のシンプルさからその復旧には急速性と低コスト性が期待できる。したがって、被災時の断面変形を事前に予測することができれば、最適断面の設計につながると考えられる。

従来、緩傾斜護岸の断面照査は、被覆石やブロックの所要質量に対して行われる。その際、模型実験で照査しない場合には、標準的な断面形状に対する所要質量算定式を用いることになる。しかし、複断面に対する標準的算定式の適用性などは十分に検討されていない。

そこで本研究では、複断面緩傾斜堤の断面変形に着目し、被覆材の安定性の実験を実施し、一般的な所要質量算定式の適用性を検討した。また、数値解析による被覆材の変形予測を実施し、被覆材の安定

性に対する数値解析の適用性を検討した。

2. 水理模型実験

(1) 実験の条件と内容

水理模型実験は、反射波吸収式フラップ型造波機とビーチ型消波装置を有する鋼製片面ガラス張り水路 (L47.0m×B0.8m×H1.6m) 内に、図-1に示す複断面緩傾斜護岸を設置して行った。模型実験で対象とした複断面緩傾斜護岸の断面は、中央粒径D50が5.4mmの捨石①、中央粒径D50が20mmの捨石②で構築される捨石傾斜堤に、625g/個の被覆ブロックと125g/個の被覆石で覆われた断面を基本断面とした。ここで用いた被覆石質量の統計量は、100~155g/個の2544試料に対して平均値が123g/個、標準偏差が13.4、歪度0.18、尖度-0.97である。

実験波は、フレッド・シュナイダー-光易型スペクトルを有する不規則波を作成し、1000波以上作用させることを基本とした。実験で用いた被覆ブロックは、写真-1に示すように、方形ブロック (L95mm×B95mm×

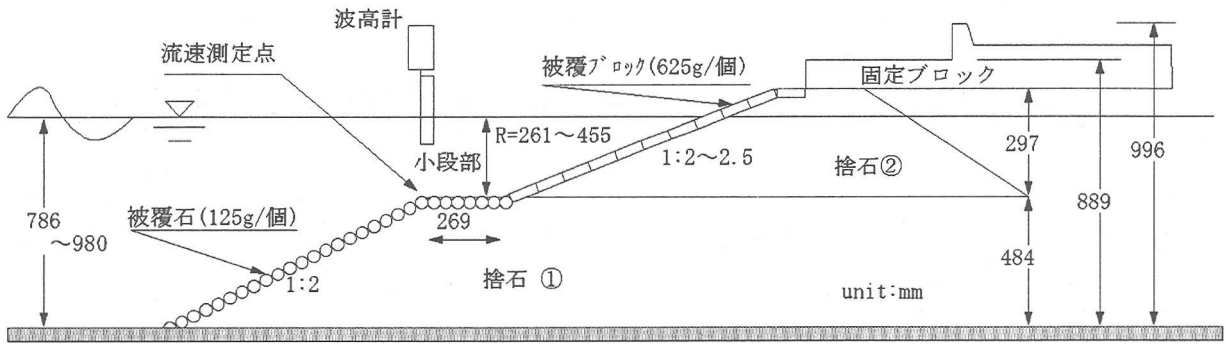


図-1 実験対象断面

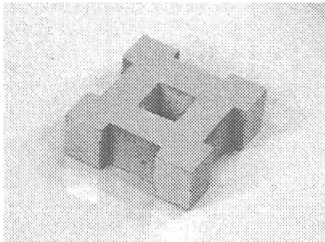


写真-1 実験に用いた被覆ブロック

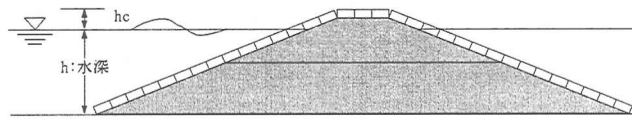


図-2 N_s 算定実験の断面図

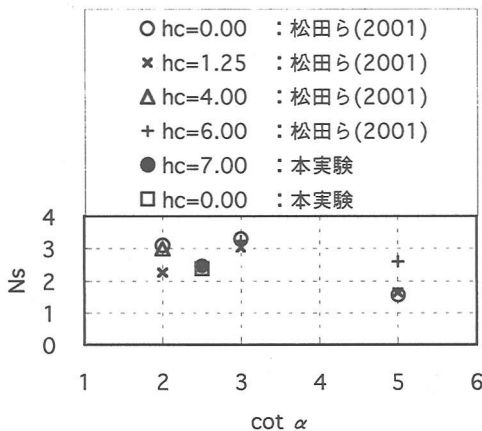


図-3 N_s の比較図

H40mm) に25%の開口を設けた単純なものである。

この被覆ブロック(以下、簡略ブロックと称す。)の基本性能を把握する目的で、松田ら¹⁾が実施した実験と同様の実験を行い、安定数 N_s を調べた。図-2は N_s を調べた実験の模型設置状況図である。図示したように、一様斜面の捨石傾斜堤を被覆ブロックで被覆し、被覆ブロックの挙動を観察して N_s を調べた。被覆ブロックに対する被災の定義は、裏返りや転落、ブロック基本長(厚み、一辺の長さ)の1/2以上移動したものとす。また、隣接したブロックに脚を掛けた場合も浮き上がり被災とし、波の繰り返し作用により脚を掛けたブロックが元の位置に戻ったり、瞬間的に浮上るが直ちに元に戻る場合

も被災とみなした。

図-3は、松田らの実験結果と簡略ブロックの N_s を比較した図である。横軸は斜面勾配で、縦軸が N_s である。図中の hc は静水面から傾斜堤天端までの高さで、単位はcmである。図の h/L は松田らの実験にあわせて表記し、本実験の h/L は0.16以上である。簡略ブロックの N_s は、松田らの結果に比べて若干小さい値になった。本実験の被災状況は、沖側法肩部に集中し瞬間的に浮上るが直ちに元に戻る場合のみであった。一方、松田らの報告によれば、被災は法肩に集中し、回転・飛散および浮上りが確認されている。被災が法肩部に集中していることは、両者で共通しているが、被災の形態は異なる。これは、 h/L が両者で一致しないこと、被災判定にはバラツキが伴うことによると考えられる。

表-1 実験条件

CASE	$H_{1/3}$ [m]	$T_{1/3}$ [s]	h [m]	R [m]	$\cot \alpha$
A1	0.2	2.0	0.915	0.455	2.5
A2	0.2	2.0	0.861	0.347	2.25
A3	0.2	2.0	0.915	0.455	2.0
A4	0.2	2.0	0.775	0.261	2.0
A5	0.2	2.0	0.861	0.347	2.5
A6	0.2	2.0	0.775	0.261	2.25
A7	0.2	2.0	0.861	0.347	2.0
A8	0.2	2.0	0.775	0.261	2.5

変形実験では、有義波高 ($H_{1/3}$) と有義周期 ($T_{1/3}$) を0.2m, 2.0sに固定し、水深 (h)、小段部天端水深 (R) および被覆ブロックを設置する斜面勾配 ($\cot \alpha$, α は水平線と斜面のなす角である) をそれぞれ変化させ、斜面勾配、小段部の天端水深が変形に与える影響を調べるため、表-1に示す条件で実験を行った。

(3) 基本実験の実験結果

基本実験のうち、特徴的な断面変形が見られた $R=0.261\text{m}$ の結果を以下に示す。

写真-2は1000波作用後のA8の小段部被覆石の様子を示し、小段部の被覆石はすべて安定性を失い、岸沖方向に大きな移動を繰り返す結果となった。また、A8より斜面勾配が急なA4の場合にも、小段部の被覆石はすべて安定性を失い、岸沖方向に大きな移動を繰り返す結果となった。その結果、A4では写真-3に示すように、被覆ブロックが斜面上を滑り落ちる変形を示した。この滑落変形は、斜面勾配がA4とA8の中間にあるA6でも発生した。A4とA6では、被覆石が安定性を失い岸沖方向に大きく移動したため、被覆ブロックの下支えがなくなり、被覆ブロックが斜面上を滑り落ちた。しかし、A8では被覆石が同様に大きく移動したにもかかわらず、被覆ブロックの滑落には及ばなかった。これは斜面勾配が急になることによって、被覆ブロックと捨石の摩擦抵抗が低下することと、反射率の増加に伴い小段部に発生する流速が増加し、被覆石のみならず捨石①の移動も顕著になり、小段部の変形がより顕著になるためと考えられる。また、小段部の上方の斜面勾配によって碎波点が微妙に異なり被覆ブロックに作用する波力が異なることも、滑落変形の一要因と推察される。

被覆ブロックと捨石の静止摩擦係数 μ を調べた結果、 $\mu=0.33\sim 1.1$ 範囲でバラツいたものの、その平均値は摩擦角に換算して28.5度を得た。一方、斜面勾配1:2の α は26.5度、1:2.25の α は24度、1:2.5の α は21.8度であり、斜面勾配1:2のA4では摩擦抵抗が低い条件になっていることがわかる。

反射率についてみると、斜面勾配1:2の場合に0.42、1:2.25の場合に0.38、1:2.5の場合に0.35であり、斜面勾配の増加にともない反射率も増加している。したがって、反射率の増加も小段部の被覆石および捨石①の不安定化を助長していると考えられる。

次に、天端水深が $R=0.347\text{m}$ の場合でも、被覆ブロックの滑落には至らないまでも、写真-4に示すように小段部の被覆石は岸沖方向に大きく移動する結果となった。 $R=0.347\text{m}$ の条件では、被覆ブロック法肩部の変形が顕著であり、写真-5に示すように飛散した被覆ブロックが斜面下方へ剥落した。 $R=0.347\text{m}$ の被覆ブロックの飛散規模は、 $R=0.455\text{m}$ の場合よりも大きく、 $R=0.455\text{m}$ で斜面勾配1:2の場合に法肩部被覆ブロックの飛散はなく、斜面勾配1:2.5の場合、水路幅方向に8個ブロックがあるうちわずか1個飛散したのみであった。 $R=0.347\text{m}$ の場合、静水位は被覆

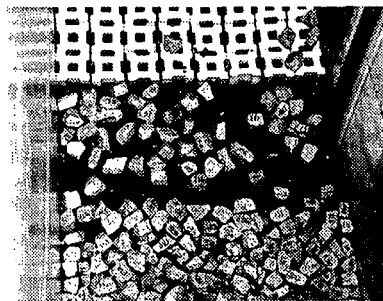


写真-2 小段部被覆石の変形 (A8)

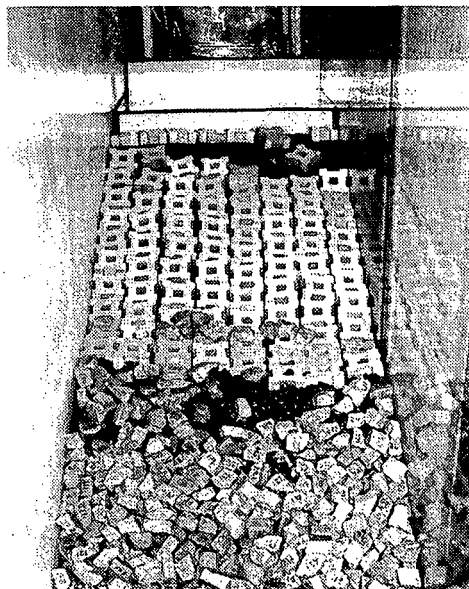


写真-3 被覆ブロックの滑落変形 (A4)



写真-4 小段部被覆石の変形 (A7)

ブロックの天端より0.06m下にあり、 $R=0.455\text{m}$ の場合には被覆ブロックの天端より0.05m上にある。このことは、ここで対象とした低天端傾斜堤の場合、天端部の被覆材の安定性に対して、最も危険な水位条件が存在することを示唆しており、波力最大水深に注意する必要がある。ちなみに、低天端の程度を示すため無次元平均越波流量 $q/\sqrt{2gH_0^3}$ を示すと、 $R=0.347\text{m}$ の場合に 10^{-5} のオーダー、 $R=0.455\text{m}$ の場合

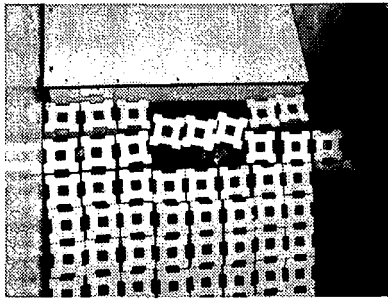


写真-5 法肩部被覆ブロックの剥落変形 (A7)

に 10^{-3} のオーダーであった。

3. 基本実験に対する対策断面の検討

(1) 対策断面

ここでは、基本実験において確認された断面変形に対して、どのような対策が効果的であるかを検討する。基本実験では、小段部の変形が顕著であり、被覆ブロックの斜面勾配が急なケースでは、小段部の変形に付随して被覆ブロックが滑落する変形も見られた。しかし、小段部の変形がなく被覆ブロックの下支えが確保できれば滑落変形は起こらないと実験の観察により判断できたので、小段部および被覆ブロック法肩部に着目した検討を行う。対策は図-4に示す5断面で、斜面勾配は1:2.5の条件とした。小段部には、基本実験とは質量が異なる被覆ブロックを敷設し、捨石②法肩部は基本実験の1.5倍の質量となる被覆ブロックを敷設した。図中(c)や(e)にあるフィルターは、被覆ブロック下層に捨石②を5cm厚で敷設したものである。検討は、対策断面に対して基本実験と同じ波を作用させて実施した。

(2) 対策断面に対する実験結果

実験の結果、小段部天端水深に関係なく捨石②法肩部の変形は見られなかった。基本実験で小段部が大きく変形した $R=0.261\text{m}$ の場合、被覆ブロック質量が基本実験と同じ $625\text{kg}/\text{個}$ で小段部を覆ったB4では、全く断面変形がなかった。

一方、小段部の被覆ブロック質量を $470\text{kg}/\text{個}$ にしたB1では、写真-6に示すように小段天端部のブロックが飛散し、捨石①も流出した。このときの变形過程は、最初に天端上沖側端の被覆ブロックがひとつ飛散し、その周辺のブロックが次々と飛散した。そして、捨石①が徐々に洗掘され、1000波作用後の洗掘深は約 5cm であった。これに対して、B1にフィルター層を加えたB3では、1000波作用後も小段部は安定であった。この結果は、フィルター層を設けたことにより被覆ブロック上下面の流速差が緩和され、揚圧力が低減したことによると考えられる。このことは、Van der Meer²⁾が示した安定数 N_s の算定式に

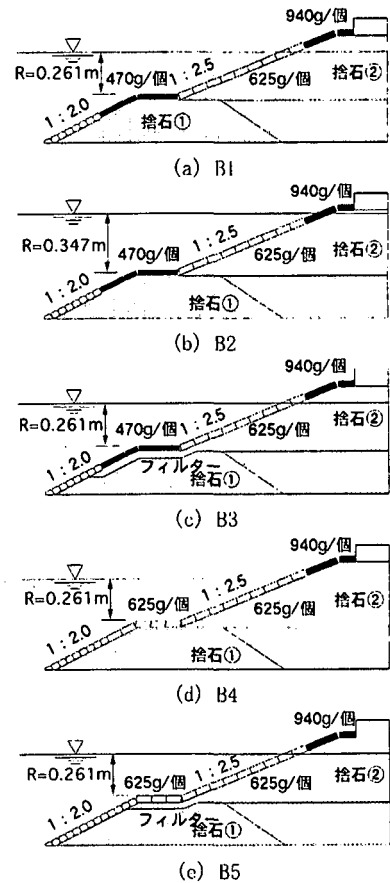
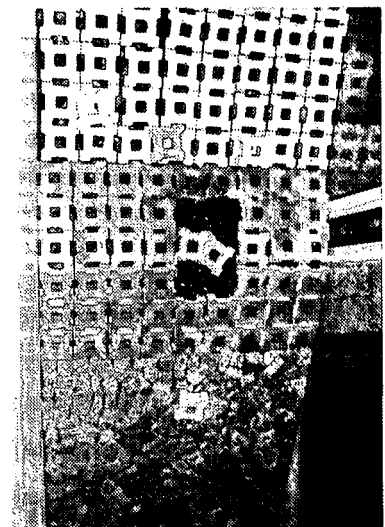
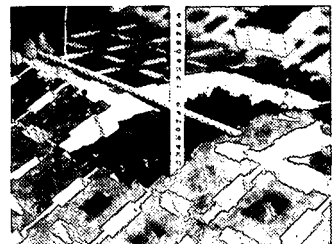


図-4 対策断面



(a) 小段部被覆ブロック



(b) 捨石①の洗掘状況

写真-6 小段部被覆ブロックの変形 (B1)

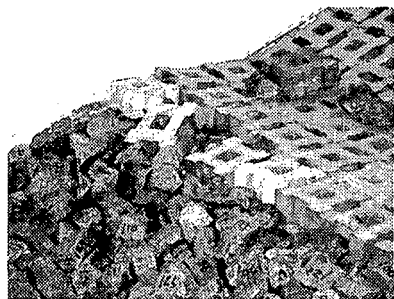


写真-7 小段部被覆石・ブロックの変形 (B5)

において、フィルター層が効果的であることと一致する。

次に、小段部の被覆ブロック数を減らす目的で行ったB5では、写真-7に示すように断面変形を示す結果となった。法肩部の被覆石は引き波作用時に不安定になり飛散し、それに伴い被覆ブロックも飛散した。したがって、小段部法肩部においては斜面部までブロックで被覆することが必要になる。

ここで、Van der Meer²⁾のNs算定式を用いて、拡張されたハドソン式により被覆ブロックの所要質量を算出する。複断面緩傾斜堤の斜面勾配として捨石①上の勾配1:2、捨石①と②の勾配を平均した1:2.25、捨石②上の1:2.5を採用し、設置水深として捨石①法先水深を採用すると、 $R=0.261\text{m}$ で初期被災 ($s=2$) のとき、それぞれ1160g/個、967g/個および829g/個となる。したがって、被覆ブロックの算定値は実験結果に比べて安全側であるが、過大になることがわかる。また、小段部天端水深と捨石②斜面を採用すると、波条件が砕波波高で規定され小さくなるため、被覆ブロックの算定値は小さくなる。したがって、複断面に対して従来の算定式を用いる場合には、注意する必要がある。

4. 数値解析の適用性

数値解析は被覆石の安定性を対象に実施した。解析手法は個別要素法と数値波動水路 (CADMAS-SURF)³⁾を組合せた手法⁴⁾を用いた。数値解析における入射波は、模型がない状態で計測した不規則波の時系列を用いた。図-5は $R=0.261\text{m}$ の条件で、小段部法肩における水位と流速について実験値と計算値を比較した図である。計算条件として、被覆石、被覆ブロック、捨石①および捨石②はポーラスメディアとして扱い、抗力係数0.5、慣性力係数2.0を与えた。計算格子は2.5cmの正方格子とした。捨石①と②の空隙率を実測すると0.40と0.43であったが、被覆石は実施工を考慮し、出来る限り隙間がないよ

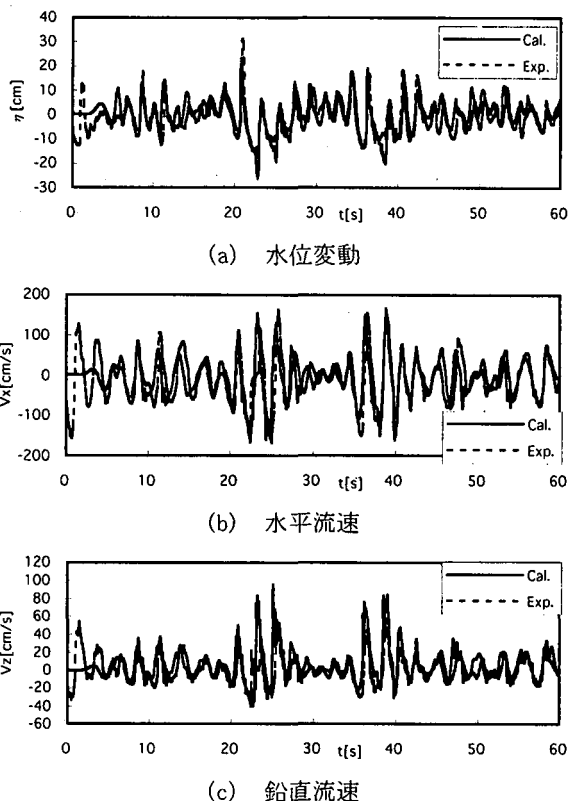


図-5 小段部における水位、流速の比較図

うに敷き詰めたので表層の空隙率はかなり低いと推測されるため捨石①と②の空隙率の半分の空隙率0.22を与えた。また、比較した時刻は、砕波を伴いながら被覆石が大規模に移動した時刻である。 $t=20\sim 40\text{s}$ 付近の波群は、大規模な巻き波砕波が生じた時刻であるが、水位・流速ともに計算値と実験値は良く一致した。ただし、計算された堤体内の流れの様子は、実験を観測した結果に比べて過大になっていると判断できた。したがって、空隙率、抵抗係数、慣性力係数に対する適切なパラメタの設定については今後の課題と考えている。

図-6は基礎実験A4に対する被覆石の変形結果を示した図である。1000波作用時の被覆石の挙動をビデオ撮影し、その結果から変形結果を記録した。小段天端部の被覆石は、高波が砕波した後の引き波時に移動を開始し、次の押し波によって被覆ブロック上にまで移動した。被覆石の移動状況は水路幅全域にわたり一様であった。移動した被覆石の一部は捨石①斜面上に落ちたが、それ以外は高波作用時に岸沖方向の移動を繰り返し、沖側に流出することはない。被覆石の移動中の様子は、隣接する石どうしの前後関係が変化しており、高波作用後は小段部に着定するが再配置が起きていた。捨石①斜面の小段部に近い部分では、被覆石の飛散はないもののロッキングが見られた。

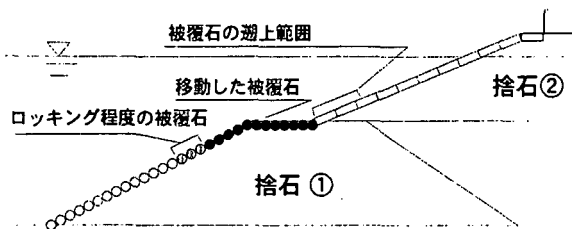


図-6 被覆石の移動に関する実験結果 (A4)

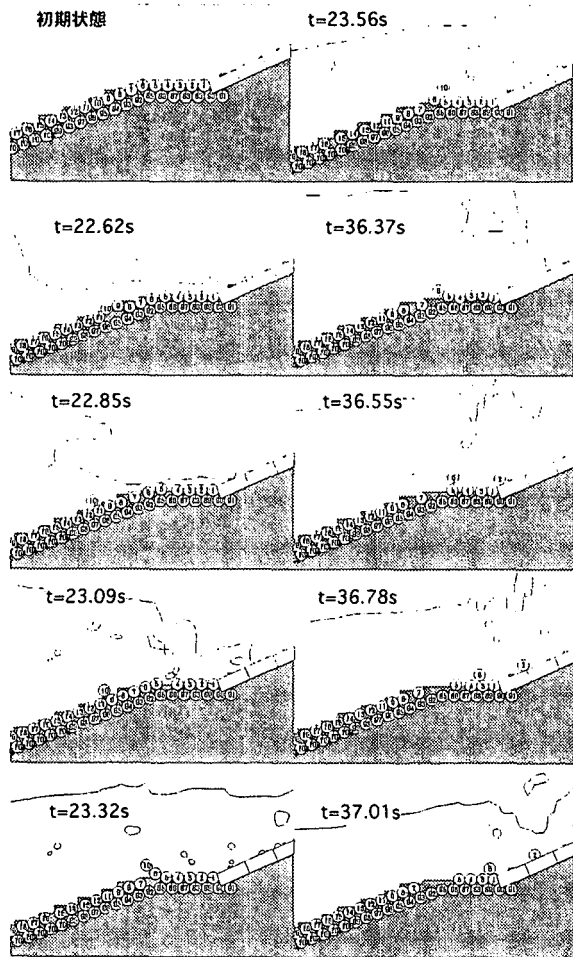


図-7 被覆石の移動に関する計算結果 (A4)

図-7に被覆石の挙動を示した。波動場の計算条件は前述のとおりで、被覆石挙動の計算は直径2.25cmの円形要素とし、抵抗係数は0.45~0.55、慣性力係数は1.35~1.65、揚力係数は0.45~0.55、摩擦係数は0.05~1.0を与え、各パラメタをランダムに組合せて各位置の被覆石に設定した。したがって、要素は同形で整然と配置されるが、各係数は隣接した要

素で異なっている。計算結果は、被覆ブロック斜面上への乗り上げや被覆石法面における移動やロックン程度の範囲までほぼ解析できている。この結果より、数値解析によって小段部における被覆石の安定性を精度良く予測できることがわかった。

5. 結論

複断面緩傾斜堤の被覆材の安定性に関する実験を実施した。Van der MeerのNs算定式を用いて拡張されたハドソン式により被覆ブロックの所要質量を算出し、実験結果と比較した結果、被覆ブロックの算定値は実験結果に比べて過大評価することがわかった。これは、算定値が高天端一様斜面を対象にしたものであるのに対し、対象断面が低天端で複断面を有するためと考えられる。また、複断面に対して標準的な算定式を適用する場合、設置水深の取り方など注意が必要である。

被覆ブロック下のフィルター層の効果確認実験を行い、フィルター層を設置することにより、被覆材質量を低減できることがわかった。これは、フィルター層が被覆材上下面の流速差を緩和するため、揚圧力を低減したことによると考えられる。

小段部の被覆石を対象とした数値解析を実施した。その結果、碎波時の水位・流速ともに実験値と計算値でよく一致した。また、捨石挙動を精度良くシミュレートできることがわかった。ただし、各パラメタの設定については、今後さらに検討が必要と思われる。

謝辞：(株)テトラの松本朗氏には、貴重な被覆ブロックの安定数に関する資料をご提供頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 松田節男・錦織和気郎・松本朗・田安正茂：天端の低い海岸構造物に用いる被覆ブロックの被災形態と安定数，海岸工学論文集，第48巻，pp.914-945, 2001.
- 2) Van der Meer: Rock slopes and gravel beaches under wave attacks, Delft Hydraulics communication No. 396, 1988.
- 3) (財)沿岸開発技術研究センター：数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会報告書，沿岸開発技術ライブラリーNo. 12, 2001.
- 4) 伊藤一教・樋口雄一・東江隆夫・勝井秀博：個別要素法に基づく捨石のランダム性を考慮した潜堤の変形予測手法，海岸工学論文集，第48巻，pp.806-810, 2001.