鉄線籠マットレスの耐津波安定性に関する実験

多田 毅¹・宮田 喜壽²・藤本 和隆³・大城戸 秀人⁴

¹ 正会員 防衛大学校 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)
E-mail: tada@jnda.ac.jp

² 正会員 防衛大学校 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)
E-mail: miyamiya@jsce.ac.jp

³ 正会員 トワロン (株) (〒592-8331 大阪府堺市西区築港新町 2-6-13) .

⁴ 正会員 岡三リビック (株) (〒108-0075 東京都港区 1-8-27)

本研究では、マウンド等の構造物の被覆材としての鉄線籠マットレスを対象として、津波を想定した流れに対する安定性を評価するために、水理模型実験によりイスパッシュ定数を算定することを目的とした。水平に設置された開水路中にステンレス製のマウンドを設置し、その天端上に鉄線籠マットレスを敷設し、流量を段階的に増加させながら定常流を与え、被災の進行度合いを流速と被災個数との関係を調査した。籠マットの配置を様々に変化させた実験を行うことで、被災プロセスとマットの配置との関係を明らかにした結果、天端の端部を適切に処置した場合や法面まで同じ条件が延長された場合などに相当する、材料および配置パターンに固有の安定性を反映した安定性の指標としてのイスパッシュ定数を算定することができた。

Key Words : steal gabion mattress, stability in tsunami, Isbash coefficient

1. はじめに

現在、東日本大震災による津波の被害を受けて、防波堤・防潮堤をはじめとする様々な海洋構造物の設計法が見直されている。特に、発生頻度の低い大きな津波に対しても可能な限り、被害を受けたとしても全壊しにくく、全壊に至る時間を少しでも長く延ばす構造上の工夫として「粘り強い構造」が提唱されている。そのためには洗掘・浸食などから構造物を守るための根固めや被覆ブロックが重要な役割を果たす。従来からのブロックに加え、河川においてすでに実績のある¹⁾、空隙の大きい礫材料を一体化した鉄線籠マットレス（籠マット）は、津波によって発生する護岸などを越流した強い流れに対する被覆材として有効と考えられるが、海岸・海洋分野における設計基準等は存在しない。

津波の流れに対する防波堤等の根固・被覆ブロック等の安定性を評価するために、イスパッシュ式²⁾が用いることが一般的である（たとえば岩崎ら³⁾、近藤ら⁴⁾など）。ただし、イスパッシュ式は対象とする構造形式や計算に用いる流速の定義などにおいて曖昧さがあることを三井ら⁵⁾は報告している。本研究では、水理模型実験によって籠マットの安定性をイスパッシュ式で評価することを目的として、可能な限り特定の構造形式に限定しない基礎的なイスパッシュ定数を算定することを目指す。

2. 実験方法

(1) 実験装置および計測方法

本実験は、図-1に示す全長16m、幅60cmの可変勾配水槽を水平に設定して使用した。この水槽の下流端から約5mの位置に、図-2に示すステンレス製のマウンドを固定した。マウンドの天端上には全面に平均粒径10mmの砕石を接着することで最大厚さ約15mmの砕石層を設置し、その上に籠マットを配置した。一般に現地では捨石等の透過性の物でマウンドが構成されることが多いと思われるが、本研究ではステンレス製で不透過のものをを用いている。これは、岩崎ら³⁾も指摘しているようにマウンド内の浸透流が被覆材に当たる流速与える影響が未解明であること、また三井ら⁵⁾が改めて指摘しているように流速の測定位置も厳密に定義されておらず用いるべき流速に厳密な規定が存在する訳ではないことから、特定の構造形式を想定していない本実験においては不確定要因を減らすことを目的として不透過のマウンドを採用した。

実験で用いた水槽はポンプ部に設置された電磁流速計による計測値に基づき流量がフィードバック制御されており、流量は既知である。そこで、図-2に示すようにマウンド天端の上流端と下流端の位置に、それぞれ容量式波高計（KENEK製、CHT4-HR30）を設置し、単位幅流量を水深で除すことで両断面での平均流速を算定した。

図-1 実験水槽

また、同じ位置にプロペラ式流速計（KENEK製、上流側VOT2-100-1、下流側VOT2-200-2）を設置し、波高計から算定した流速の確認を行った。さらに、水路上面および水路側面からビデオ撮影を行い、画像解析によって任意の時刻の任意の地点における水深を算定した。実験中の水深分布の例を写真-1に示す。

図-2 マウンド部の概要

(2) 籠マット模型

本実験では、厚型および薄型の2種のかごマット模型を使用した。模型の写真を写真-2に、模型の諸元を表-1に示す。表中に示した密度は、詰石と金網それぞれの体積と質量を計測し、そこから算定した複合体としての密度に基づいているため、体積も質量も同じである厚型と薄型とで、異なる値となっている。模型製作上の制約から、模型の金網の剛性および籠マット自体の剛性を任意に調整することができなかったため、特定の現地スケールでの強度は想定しておらず、定性的には一般的な製品よりも強度が過大である可能性がある。このことが結果に与える影響については第3章において議論する。

(3) 実験手順および実験条件

実験は以下の手順にしたがって実施した。

1. マウンドの天端上に籠マットを敷設し、水路下流端の堰を上げ、水路床からの静水深が20cmとなるよう水路を水で満たす
2. 上流側からの流量を徐々に増加させる。このとき、マウンドより下流側の水位が20cmを維持するよう水路下流端の堰の高さを調整する。
3. 規定の流量に達した後、1分間一定の流量を維持する。
4. 1分間経った後、流量を次の段階まで増やす。同時に下流端の堰を下げ、下流側の水位を維持する。
5. 籠マットが被災した場合、時刻と位置を記録する。
6. ステップ3から5を繰り返す。なお、流量が増加するとマウンドを越える流れが完全越流となり、マウンド通過直後の水深は20cmを下回り、それより

写真-1 実験中の水深分布の例

a) 厚型 b) 薄型

写真-2 籠マット模型

表-1 籠マットの諸元

	厚型	薄型
長さ (cm)	6.0	12.0
幅 (cm)	4.0	4.0
厚さ (cm)	2.0	1.0
質量 (g)	76.8	76.8
密度 (g/cm ³)	2.96	3.17

下流側の水位の影響は小さくなる。

7. 最大流量に達した後、実験を終了する。

流量は単位幅で0.0694m²/sから0.333m²/s までの18段階とし、その時の流速は天端の上流端で約0.6m/sから1.1m/s、

下流端で約0.7m/sから2.1m/sであった。

実験中に籠マットがそれぞれの長さの1/2以上移動した時に被災したと認定し、その時点・その位置での局所流速を算定、記録した。局所流速の算定は、天端上下流端の水深の記録と被災した籠マットの位置から局所水深を算定し、ポンプ部において電磁流量計で計測された流量を局所水深で除すことで行った。

(4) 実験ケース

本実験では、被覆材としての性能に影響すると予想される、敷設列数、ユニット間の隙間の有無、天端上流側端部と下流側端部の余地の有無、以上4種の条件の組み合わせを変化させ、厚型籠マット7ケース、薄型籠マット7ケースの全14ケースを行った。実験ケースの一覧を表-2に示す。また、初期配置と実験終了時の最終状態の様子を図-3に示す。図-3の被災状況からもわかるが、初期状態から徐々に流速を上げていくと、多くの場合で天端の上下流端からマットの転倒・滑動が発生し、流速の増加に伴い被災個数が増加してゆく。本実験では端部を適切に処置した場合や法面まで同じ条件が延長された場合などに相当する、特定の構造形式に依存せず材料および配置パターンに固有の安定性を反映した指標としてのイสบッシュ定数を算定することを目指したため、極端に弱い天端端部を避けた配置を実験ケースに含めている。

(5) 実験スケールおよび相似則

本実験では、実験のスケールとして1/50を想定した。物理量の換算にはフルード相似則が適用される。したがって、現地スケールでの大きさは、厚型籠マットは流れ方向長さ3m×幅2m×厚さ1m、薄型籠マットは流れ方向長さ6m×幅2m×厚さ50cm、籠マットを敷設したマウンドの天端部は長さ50m×幅30mとなる。現地での流速は、実験時の流速に7.07を乗じることで換算される。本論文では、実験時の物理量から直接イสบッシュ定数を算定する。イสบッシュ定数はスケールの影響を受けないことから、実験スケールで算定されたイสบッシュ定数は、フルード相似則に従って現地スケールに換算された物理量から算定された値と等しくなる。

3. 結果と考察

(1) 被災パターンの分類

一般にイสบッシュ定数の算定では、被災個数が一定の閾値を超えた時点での流速を限界流速とし、その後の被災の進行状況は検討対象外である。しかし本実験では、籠マットの配置によって実験開始直後に被災が始まるがその後なかなか進行しない、実験中盤まで被災しないが

表-2 実験ケース

ケース名	タイプ	列数	隙間	上流端余地	下流端余地
A-1	厚型	1	広	有	有
A-2	厚型	2	広	有	有
A-3	厚型	3	広	有	有
A-4	厚型	12	広	有	有
A-5	厚型	14	広	無	無
A-6	厚型	12	狭	有	有
A-7	厚型	15	狭	無	無
B-1	薄型	1	広	有	有
B-2	薄型	2	広	有	有
B-3	薄型	3	広	有	有
B-4	薄型	7	広	有	無
B-5	薄型	7	広	無	有
B-6	薄型	7	狭	有	無
B-7	薄型	7	狭	無	有

ケース A-3

ケース A-4

ケース B-7

図-3 初期配置と最終状態の例

被災開始後に一気に進行する、など、被災開始時期と被災開始後の進行状況に配置の影響が顕著にみられたことから、観察された現象に基づき、被災パターンを以下の4種のタイプに分類した。

a) 延性抵抗モード

端部などの弱い部分から徐々に被災が始まるが、その後、流速の増加にともなう被災個数の増加が一定の割合に落ち着く。このモードは、一定の列数以上で、天端上下流端部に籠マットを配置せず余地を

図-4 流速-被災個数関係と限界流速の定義

持たせたケースにおいて観察される。

b) 低拘束破壊モード

被災の始まる流速は低流速破壊モードほど小さくないが、被災が始まると延性抵抗モードよりも大きな割合で被災個数の増加が進む。このモードは、列の数が十分でないケースにおいて観察される。

c) 低流速破壊モード

非常に小さい流速から端部の被災が始まり、その後少しずつ被災が進行する。このモードは、天端上下流端部ぎりに籠マットを配置したケースにおいて観察される。

d) 拘束抵抗モード

延性抵抗モードと同程度の流速から端部の被災が始まるが、その後、籠マット同士が噛み合うことで、延性抵抗モード以上の強さを発揮する。このモードは、籠マットを隙間なく配置し天端の上流端に余地を持たせたケースにおいて観察される。

実験における時間の進行は流速の大きさと対応していることから、現象の本質は流速の増大と被災の進行との関係である。本実験で典型的にみられる流速-被災個数関係を図-4に示す。また、4種のモードごとにまとめた厚型籠マットにおける流速と被災個数の関係を図-5から図-8に、薄型における関係を図-9から図-12に示す。モードによって明らかに被災の進行状況が異なることがわかる。

(2) 限界流速の定義とイスバッシュ定数の算定

被災個数と流速の関係をみると、いずれのケースでも、流速が増加してゆくにしたが、その関係が直線状の定常状態に近付くことが観察される。そこで、定常状態となった部分が被覆材としての本来の性能を示していると考え、直線を下方に延長し、被災個数が1個となる流速を、許容限界流速として定義した。続いて、求めた限界流速と、籠マットモデルの諸元より、実験ケースごとに次式を用いてイスバッシュ定数を算定した。

図-5 延性抵抗モードが観察された実験ケース (厚型)

図-6 低拘束破壊モードが観察された実験ケース (厚型)

図-7 低流速破壊モードが観察された実験ケース (厚型)

図-8 拘束抵抗モードが観察された実験ケース (厚型)

$$W = \frac{\pi \rho U_0^6}{48 y^6 g^3 (\rho / \rho_0 - 1)^3 (\cos \theta - \sin \theta)^3} \quad (1)$$

ここで

図-9 延性抵抗モードが観察された実験ケース（薄型）

図-10 低拘束破壊モードが観察された実験ケース（薄型）

 W : ユニット質量 (g)

 U_0 : 限界流速 (m/s)

 ρ : ユニットの密度 (g/cm³)

 ρ_0 : 水の密度 (g/cm³)

 θ : 傾斜角 (rad)

 g : 重力加速度 (m/s²)

 y : イスパッシュ定数

である。全実験ケースで得られた限界流速とイスパッシュ定数を表-3に示す。

ここで、限界流速の定義として最初に被災が発生した時点の流速としなかったことから、たとえば図-5の延性抵抗モードのグラフ中の白抜きの点に見られるように、定義した限界流速よりも遅い流速で複数の被災が発生することになる。このことは、本論文で算定した定数を使用する際は、天端端部などの特に脆弱な部分を適切に固定・補強することが条件となることを意味する。

また、拘束抵抗モードでは非常に高い限界流速を示すが、籠マット同士が拘束し合うというメカニズムにおいてモデルの強度が安定性にプラスの影響を与えている可能性があるため、この結果はあくまで最大に性能を発揮した場合と考えるべきであろう。

(3) 籠マットのイスパッシュ定数

前節の考察結果より、端部を適切に処置した場合や法

図-11 延性抵抗モードが観察された実験ケース（薄型）

図-12 低拘束破壊モードが観察された実験ケース（薄型）

表-3 実験結果のまとめ

ケース名	実験条件※	現象のモード	限界流速 (m/s)	イスパッシュ定数
A-1	厚1 広有有	低拘束破壊	0.93	0.78
A-2	厚2 広有有	延性抵抗	1.31	1.10
A-3	厚3 広有有	延性抵抗	1.33	1.12
A-4	厚12 広有有	延性抵抗	1.37	1.15
A-5	厚14 広無無	低流速破壊	0.78	0.66
A-6	厚12 狭有有	拘束抵抗	1.71	1.44
A-7	厚15 狭有有	低流速破壊	0.4	0.34
B-1	薄1 広有有	低拘束破壊	1.30	1.05
B-2	薄2 広有有	低拘束破壊	1.32	1.07
B-3	薄3 広有有	延性抵抗	1.61	1.30
B-4	薄7 広有有	低流速破壊	1.10	0.89
B-5	薄7 広無有	低流速破壊	0.63	0.51
B-6	薄7 狭有無	拘束抵抗	1.81	1.46
B-7	薄7 狭無有	低流速破壊	0.65	0.53

※ 実験条件は、左から籠のタイプ、流れ方向の配置列数、籠間の隙間の有無、上流側余地の有無、下流側余地の有無をそれぞれ意味する。

面まで同じ条件が延長された場合などに相当する、特定の構造形式に依存しない材料および配置パターンに固有の安定性を反映したイスパッシュ定数 y として、厚型、薄型それぞれにおいて、延性抵抗モードが観察された各実験ケースの平均値とする。その結果、厚型籠マットで $y=$

1.1, 薄型籠マットで $y=1.3$ となる。なお, 各ユニットが隙間なく密に配置されかつ上下流の端部が十分に保護・固定された場合には拘束抵抗モードとなり, 厚型籠マットで $y=1.4$, 薄型籠マットで $y=1.5$ 程度まで大きくなる可能性がある。ただし, 1列以下(厚型)または2列以下(薄型)で設置されている場合, 天端の上流端または下流端ぎりぎりに設置されている場合などの条件下では, ここで示した性能が発揮されないことに注意が必要である。

4. まとめ

本研究では, マウンド等の構造物の被覆材としての鉄線籠マットレスを対象として, 津波などによる強い流れに対する安定性を評価するために, 水理模型実験によりイスバッシュ定数を算定し, 以下の結論を得た。籠マットを被覆材として用いた構造物を設計する場合, 低流速破壊モードまたは低拘束破壊モードにならず, 延性抵抗モードとなるよう, 籠マットの配置および端部の処理を適切に行うことが望ましく, その場合のイスバッシュ定数は, 厚型籠マットで $y=1.1$, 薄型籠マットで $y=1.3$ となる。また, 拘束抵抗モードとなるよう慎重に設計・施工した場合には, 厚型かごマットで $y=1.4$, 薄型かごマットで $y=1.5$ が期待される。これらの値は, 一般的に知られている, 埋め込まれた石 (1.20) や異形ブロック (1.08) と同等かそれ以上である。

一般的に, 単位面積当たりの被覆材の重量が大きいほど, マウンド被覆材の安定数が大きくなることが知られているが, 本研究では逆の結果が得られている。その理由は, 籠マットの形状が薄型と厚型とで相似形でないことにある。薄型は, 流れに対する前面投影面積が小さいため流れによって働く重量あたりの流体力が小さく, また転倒時に支点となる下流側端部から流体力の合力の作用点までの距離が長く, 転倒するために必要なモーメントが大きいことが, 厚型よりも大きなイスバッシュ定数となった要因と思われる。

参考文献

- 1) 国土交通省河川局治水課：鉄線籠型護岸の設計・施工技术基準（案）, 2009.
- 2) Coastal Engineering Research Center: Shore Protection Manual, U.S. Army Corps of Engrs, U.S. Govt. Printing Office, Vol.II, 1977.
- 3) 岩崎敏夫, 真野明, 中村武弘, 堀越伸幸：潜堤のマウンド材およびプレパックド堤に作用する定常流体力に関する実験的研究, 海岸工学論文集, Vol.31, pp.527-531, 1984.
- 4) 近藤圭央, 有川太郎, 関克己, 村川はるみ：3次元数値波動水路を用いた防波堤堤頭部の被覆材移動による被災の検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. B2-65, No.1, pp.861-865, 2009.
- 5) 三井順, 松本朗, 半沢稔：イスバッシュ式の導出過程と防波堤を越流する津波への適用性, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.71, No.2, pp.1_1063-1_1068, 2015.

(2016.2.4 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON STABILITY OF STEEL GABION MATTRESS AGAINST TSUNAMI-INDUCED FLOW

Tsuyoshi TADA, Yoshihisa MIYATA, Kazutaka FUJIMOTO and Hideto OKIDO

This study aims to evaluate the stability of steel gabion mattress against tsunami-induced strong flow through hydraulic model tests. Performed tests are to observe the scaled mattresses on the mound under steady flow condition. The flow velocity was increased step by step and the relationship between number of damaged mattresses and the velocity was observed. A series of tests were performed to investigate the effect of mattress layout condition and the Isbash coefficient was determined from the critical velocity observed in each test case. Their coefficients are almost same as one of precast concrete armor units or embedded stone. This study shows high performance of the gabion mattress.