

図-1 実験水路・模型図 (左:水路平面図・水路断面図, 右:平面図・模型断面図)

なる (図-2 参照). 端部, 石との境界部ではせん断力が作用するものの, 本検討では考慮しない.

任意の断面ABについて, F により断面積 A 当りに作用する力, つまり引張応力 σ_F と, モーメント M によって発生する最大応力 σ_M について考える (図-2 参照). ひずみが微小で応力と線形関係にある弾性範囲では, マット上面, 下面に生じるひずみ $\varepsilon_A, \varepsilon_B$ は, $\varepsilon_F, \varepsilon_M$ を用いて図-3のような関係となる. よって F は式(1)のように算定できる.

$$F = \sigma_F A = E \varepsilon_F A = E \frac{(\varepsilon_A + \varepsilon_B)}{2} A \quad (1)$$

ここで, E : ひずみに対する応力の比例係数, つまり, ヤング率である. なお, 本実験においてマットのひずみ-応力関係が線形であったことは後述する物性試験で確認した.

(2) 水理模型実験

a) 実験条件

水理模型実験は, 港湾空港技術研究所所有の105m造波水路で実施し, 縮尺1/25の防波堤模型を設置した (図-1 参照). 基礎マウンド, 腹付工には縮尺を考慮し5号碎石を使用した. 洗掘防止マット模型は, 厚さが約2.5mm程度であり, 揚圧力低減のため, 開口率20%の有孔とした. マットは, 腹付工全体に敷設した. その際, 上からおもりをのせて荷重をかけ, また, ドライヤーで温めることで, 現地での腹付工の捨石や被覆ブロックへのアスファルトマットの付着を模擬した (図-4 参照). また, 越流によりマットが浮き上がらないよう, その前後端には根固工としておもりを設置し固定した.

マットには, 上下両面にひずみゲージを取り付け, 動ひずみアンプに接続し, 越流中にマット表面に生じる

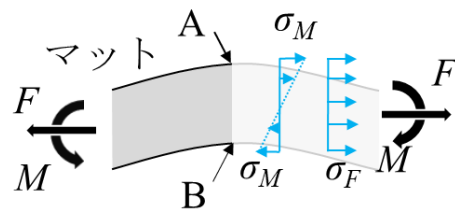


図-2 マットの断面 AB に作用する応力 σ のイメージ

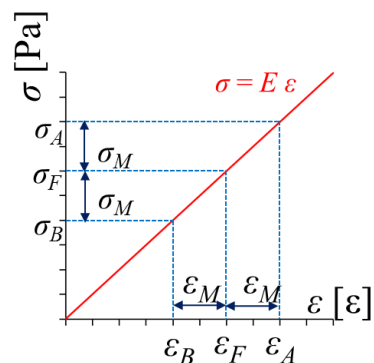


図-3 応力 σ -ひずみ ε 関係



図-4 現地のアスファルトマットがケーソン下面に付着している様子

表-1 実験ケースごとのひずみ ϵ

被覆ブロックなし								被覆ブロックあり					必要質量 m [g]
h_f [cm]	h_r [cm]	case	St1 [$\mu\epsilon$]	St2 [$\mu\epsilon$]	St3 [$\mu\epsilon$]	St4 [$\mu\epsilon$]	case	St1 [$\mu\epsilon$]	St2 [$\mu\epsilon$]	St3 [$\mu\epsilon$]	St4 [$\mu\epsilon$]		
61	53	1	-13.4	-12	-10.3	-13.2	16**	-18.2	-14.8	-12	-6	0	
61	48	2	-1.6	-1.5	-8.1	-3.1	17	0.3	1.1	-3	1.3	2	
61	44	3	3	-22.2	-7.5	-16.9	18	1.3	-1.4	-6.6	1.7	3	
61	38	4	6.6	-20.1	-1.4	3.6	19	-0.1	-2.2	-8.4	2.4	7	
61	33	5	-11.3	-16.6	-3.1	-0.7	20	5.6	-3.8	-10.3	-0.1	22	
59	28	6	47.9	7.9	9.5	8.9	21*	15.1	-1.4	-8	2.4	147	
64	51	7	-16.5	-15.4	-17.1	-19.5	22	-6.1	-4	-6.6	-0.2	6	
64	46	8	-40.2	2.7	24.5	-3.4	23	-7	-4.4	-12	-0.2	19	
64	41	9	2.9	8.1	38.6	49.8	24	0.2	2.5	-5.1	0.9	47	
64	37	10	19.2	17.4	57.6	12.9	25	16.5	54.8	-27.3	-1.8	68	
64	31	11	30.9	14.9	48.5	9.7	26	-2.4	18.7	-47.8	-8.3	300	
69	50	12	6.5	75.3	41.1	-19.1	27	-11.6	-0.3	-13	0.9	76	
69	45	13	24.8	105.3	53.4	-13.6	28**	-11.8	-15.9	-10.3	4.5	260	
69	39	14	54.9	153.1	110.3	-12.8	29	-10.2	3.4	-12.6	-0.9	563	
69	35	15	83.1	200.8	172	58.1	30**	-5.9	22.9	-4.3	-18.7	1102	

h_f :前面水位 h_r :背面水位

表中青色は引張ひずみでその大きさを示し、赤色は圧縮ひずみを示す。

St1:マウンド水平部のひずみ計

被覆ブロックありのケース番号が無印のものの水位は被覆ブロックなしのケースと同条件

St2:~St4:マウンド法肩より80,160,240mmのひずみ計

*: h_f が同条件のブロックなしと比べ2cm高い。

**: h_f が同条件のブロックなしと比べ1cmズレがある。

ひずみの測定を行った。なお、ひずみゲージは図-1の模型断面図に示した位置のマットの上下両面に設置した。また、堤体前後端に容量式波高計、プロベラ式流速計を配置し、越流の状況の計測も併せて行った。

実験は、模型が水没した状態で開始した。実験開始後、ポンプを起動させ、模型背後に設けられた貯留槽内を排水しその水位を下げることで循環流による越流を各ケース4分間発生させた(図-5参照)。

実験ケースは、図-1の水路断面図に示す波高計WG1で測定した前面水位 h_f とWG4で測定された背面水位 h_r の組み合わせとした(表-1参照)。ここで、 h_r は、貯留槽と模型背後を仕切る堰の高さによって調整した。実験についてはケース番号順に行った。case12~case14で腹付工法面の砕石が一部崩れたが(図-6参照)、以降のケースが、背後水深 h_r はより小さくなり、被災も大きくなることが想定されるケースだったため、断面は復旧せず、実験を継続した。

また、被覆ブロックが飛散した場合を想定し、飛散後に作用する引張力についても検討するため、被覆ブロックを設置していない断面についても実験を行った。なお、被覆ブロック設置時(case16開始前)には断面の復旧を行った。

b) 実験結果

実験中、ひずみゲージで計測されたデータには、越流作用前からノイズが確認されていたため、ひずみゲージの計測値については、すべて遮断周波数を1.0 Hzとするローパスフィルターで処理を行った。マットに作用した

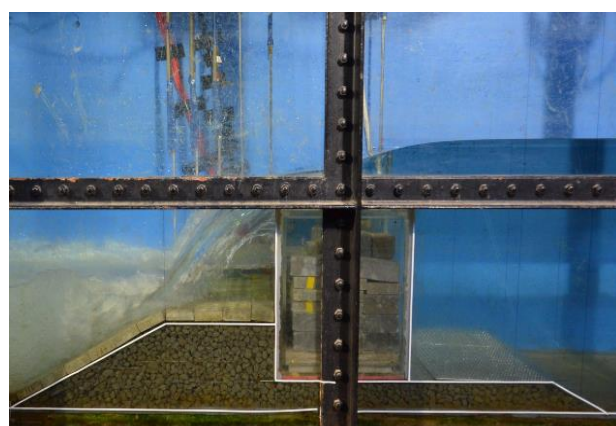


図-5 実験写真(case 30)



図-6 腹付工法面の捨石の一部崩れの様子(case15)

引張力によるひずみ ϵ_{rl} について、各ケースの結果を表1に示す。

今回の実験では、被覆ブロック設置時に計測されたひずみは、ブロックがない時のひずみに比べて小さかった。マットが被覆ブロックに押さえられ、浮き上がりが生じなかったためと考えられる。マットの強度を検討するうえで、安全側に設計することを考え、引張についての検討では被覆ブロックがないケース(case1~15)の結果を用い解析を行った。

(3) 洗掘防止マット模型の物性試験

a) 引張試験

水理模型実験で用いたものと同様のマットについて、インストロン試験機で荷重をかけ、ひずみゲージでひずみを測定する引張試験を行った。供試体の寸法は JIS A 6013 に従い、供試体数は5体とした。

計測は、水理実験で計測された最大のひずみ変化の速度 $1700 \mu\text{s}$ 、実験時の水温 $7\sim 8^\circ\text{C}$ に合わせて最大ひずみ $1,000 \mu\epsilon$ まで行った。その一例を図-7 に示す。それぞれの供試体の計測結果について、応力 σ とひずみ ϵ の関係を線形近似すると、測定値と線形近似式の相互相関係数 R は $R=0.98\sim 1.0$ となり、実験に使用したマットの応力-ひずみ関係は、実験の範囲内で線形の関係であった(式(1))。ヤング率 E については、供試体5体の平均値として、 $E=786.5 \text{ MPa}$ とした。

b) 付着強度試験

付着強度試験では、5号砕石の上に、マット、コンクリートブロックを設置した。ブロックを 10 mm/min の速度で引き上げてマットから引きはがし、その際の荷重と変位の関係を計測した。なお、供試体は設置後に上から荷重をかけ30分静置し、水理実験での付着状態を再現した。実験結果の一例を図-8に示す。

ブロックがマットからはがれ始める荷重は、サンプルによりバラつきがみられ $13.0\sim 26.2 \text{ N}$ (供試体数5体)、平均値は 17.7 N (1.80 kgf) であった。これは、载荷したときの供試体を設置した砕石の凹凸、マット模型自身の凹凸により付着面積に差がありばらついたためと考えられる。ブロック、マットの孔を無視した面積で、荷重を除いた付着強度 w は $w=2.77 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ であった。

(4) 洗掘防止マットの設計手法と安定性についての検討

a) 引張応力についての検討

水理模型実験と引張試験の結果から得られたひずみ ϵ_F とヤング率 E によりマットに働いていた応力が算定された。各ケースごとの計測点の中で最大だった引張応力 σ_F について、運動量を用いて以下のように整理を行った。洗掘防止マットに作用するマット方向の力 F による単位

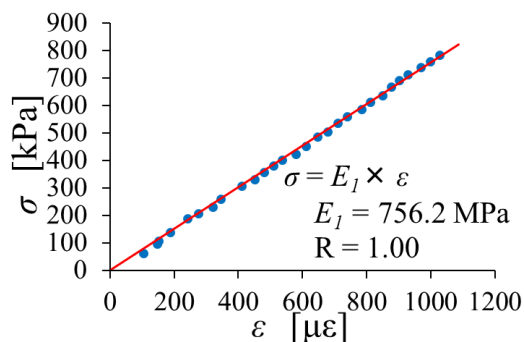


図-7 引張試験結果の一例

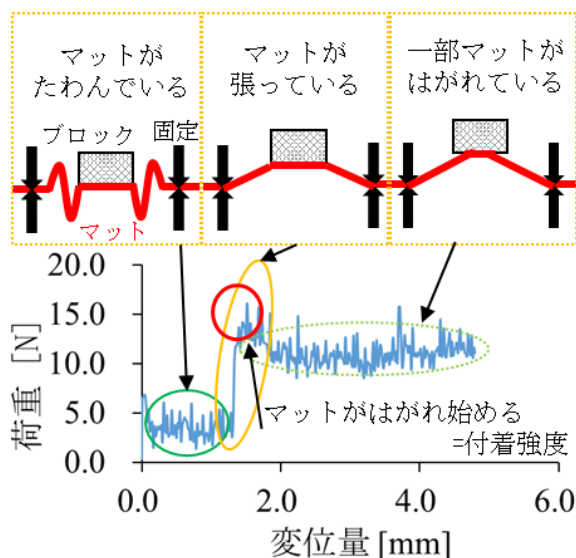


図-8 付着強度試験の結果の一例

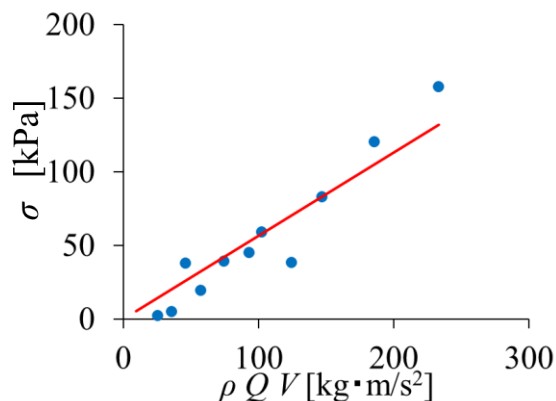


図-9 越流の時間当たりの運動量 $\rho Q V$ とマットに作用する引張応力 σ_F の関係

時間 dt 当りの力積 I とする。 I は越流水の運動量 $m_w V$ に比例するものとし、定数 C を用い、式(2)のように仮定する。

$$I = Fdt = Cm_w V \quad (2)$$

ここで、越流水の質量 m_w は密度 ρ 、流量 Q に時間をかけたもので式(3)のように表すことができる。

$$m_w = \rho Q dt \quad (3)$$

マットに作用している引張応力 σ は F をマットの断面積 A で除したものである。以上より、引張応力と水理条件の関係式は、式(4)のようにまとめられる。

$$\sigma_F = F/A = C/A \times \rho Q V \quad (4)$$

図9は越流水の時間当たりの運動量 $\rho Q V$ とマットに作用する引張応力 σ の関係である。ここで、 V は越流水がマットに衝突するときの流速であり、堤体天端後端での水深、流速を用いて三井らの提案手法で求めた。 $\rho Q V$ と σ は比例関係にあり式(4)の係数 C を適切にとることで、マットの引張応力を算定できることがわかった。また、三井らの提案する算定図を用いることで、津波襲来時の前背面水位と防波堤の形状から種々の津波越流に対するマットの引張応力を算定することが可能である。

b) マットの試設計

本実験の結果から得られたマットに作用する引張力については、フルード相似則に従うものと考えられる。試設計として、本実験で最も大きな応力が生じたケースについて、マット模型と同一の応力が作用するとして、現地スケールに換算し、洗掘防止マットの必要強度の試計算を行った。被覆ブロックがない場合、越流水深3.75 m、水位差 8.5 mの津波の越流によって、マットには幅1 m当りの引張力が最大197.4 kN作用する。

ここで、本検討ではアスファルトマットの引張に対する強度の検討を行っているが、アスファルト合材の引張試験は治具による固定が困難で、また、設置後は被覆ブロック、砕石などに食込み・変形し、断面が薄くなり、アスファルト合材部分の引張強度の評価は難しい。そこで本検討では、芯材の強度がマット全体の引張強度と考え設計することを提案する。以上の検討から幅1 m当りの引張強度が200 kN以上の洗掘防止マットを用いることが必要であることがわかった。

c) 付着についての検討

例えば片岡ら²⁾は防波堤のケーソン底部に設置されたアスファルトマットが、ケーソンに付着していた事例を報告している。このことから、アスファルトを材料とした洗掘防止マットは、腹付工の捨石、被覆ブロックと付着し、その安定性を高める効果が期待される。そのため、水理実験では、マットを設置する際に、上から荷重をかけて付着させることで、付着についても再現を試みた。

水理模型実験における被覆ブロックについて、イスバッシュ式⁶⁾、三井ら³⁾の提案手法で計算される必要質量 m の1/4程度の質量でもブロックの被災は確認されなかった。このことから、マットの付着性がブロックの安定性に寄与することが示唆された。そこで、付着力を考慮した被覆ブロックの必要質量 m' について検討を行った。マットの付着力の分布 w を、イスバッシュの示した石の

回転モーメントのつり合い方程式に付着によるモーメント N の項を加えた(式(5))。

$$k \rho_w \frac{V^2}{2g} a^2 \xi a + (\rho_s - \rho_w) a^3 \sin \alpha \left(\frac{a}{2} - \zeta a \right) = (\rho_s - \rho_w) a^3 \cos \alpha \frac{a}{2} + \frac{N}{g} \quad (5)$$

ここで、 k :形状係数、 ρ_w :水の密度、 ρ_s :ブロックの密度、 a :ブロックの直径、 ξ :回転中心から抗力作用線までの距離を a で除したもの、 ζ :回転中心から底部までの斜面方向垂直距離を a で除したもの、 α :斜面の勾配角度である。

付着による力はブロック底面に均一に働いているものと考え、 N は以下ようになる。

$$N = \int_0^a w a x dx \quad (6)$$

ここで、 w :マットの付着力の分布荷重である。

式(5),(6)を用い、イスバッシュと同様に、 $\zeta=0.5$ とし対象物を直径 a の球と仮定し必要質量 m' を計算する。

$$m' = \frac{\pi \rho_s \left(\frac{V^2}{2Y^2} - \frac{w}{\rho_w} \right)^3}{6g^3 (S_r - 1)^3 \cos^3 \alpha} \quad \text{where} \quad Y = \sqrt{1/2 \zeta k} \quad (7)$$

ここで Y :イスバッシュ数、 S_r :水に対するブロックの比重である。

本実験ではブロックの必要質量より付着力の影響が大きかったため、すべてのケースにおいて $m'=0$ gとなった。ブロックとアスファルトマットとの付着は、ブロックの重量によるものと考えられるため、被覆ブロックにある程度の質量は必要ではあるものの、マットを用いることで、被覆ブロックの質量を小さくできることが示された。

3. まとめ

本検討より以下のことが示された。

- ・腹付け工上に設置した洗掘防止マットに越流が定常的に作用するとき、マットに作用する引張力の大きさは、その越流水の持つ運動量を用いることで精度良く算定することができた。
- ・このことから、現地においても津波襲来時の前背面水位と防波堤の形状からマットに発生する引張応力を算定する方法を提案した。
- ・試設計の結果から、想定断面に越流水深3.75 m、水位差 8.5 mの津波の襲来が想定される場合には、幅1 m当りの200 kN以上の引張力に耐える洗掘防止マットを用いることが必要であることがわかった。
- ・マットの付着力によって被覆ブロックの安定性が向上することが示された。

また、今後の課題として以下のことが挙げられる。

- ・マットの形状、防波堤の形状による影響についてさらなる検討が必要となる。
- ・本実験では、レイノルズ数 Re が $Re = 1.5 \times 10^4$ 程度であったため、縮尺による影響が懸念される。今後より大きな縮尺の実験による検討が必要となる。
- ・マットの付着力については、フルード相似則に従わないことが想定されるため、その影響を推定するにはさらなる検討が必要となる。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局: 防波堤の耐津波設計ガイドライン, 2013.
- 2) 有川太郎, 佐藤昌治, 下迫健一郎, 富田孝史, 廉慶善, 丹羽竜也: 津波越流時における混成堤の被災メカニズムと腹付工の効果, 港湾空港技術研究所資料, No. 1269, 2013.
- 3) 三井順, 久保田真一, 松本朗, 半沢稔: 堤港内側マウンド被覆ブロックの耐津波安定性に及ぼす上部工形状の影響, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 72, No. 2, pp. I_1111-I_1116, 2016.
- 4) 有川太郎, 岡田克寛, 下迫健一郎: 防波堤の腹付け被覆ブロックの安定性, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 70, No.2, pp.I_941-I_945, 2014.
- 5) 片岡真二, 西宏一, 矢島道夫, 三浦修: ケーソン下面に敷設した摩擦増大のためのアスファルトマットの耐久性について, 海岸工学講演会論文, Vol. 30, pp. 643-647, 1983.
- 6) Isbash, S.: Construction of Dams by Dumping Stones into Flowing Water, Sci. Res. Inst. Hydrotech. Leningrad, 1932, translated by Dovjikov, A., U.S.A.C.E., 1935.

(2017.3.15 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON DESIGN OF SCOURING PROTECTION MAT ON WIDENING WORK

Tsukasa KITA, Toshio OHNO, Futoshi HOSHINO, Kojiro SUZUKI

To protect breakwaters with widening works from scouring caused by tsunami overflow, it is proposed to cover widening works with scouring protection mat. However, few studies have focus on the strength design of scouring protection mat. Thus, this study conducted hydraulic model experiments and properties test to estimate tension exerted on mats against tsunami overflow.

We rearrange the experimental results from the point of view of the momentum of overflow. From the results, an experimental formula was proposed for estimating tension exerted on scouring protection mats covering widening works behind caissons of breakwaters against tsunami overflow. After that we try designing prototype-scale scouring protection mat. Additionally, it is confirmed that asphalt, which is a common material for mat, adhesion to blocks. It suggests that scouring protection mats may improve the stabilities of armoring blocks.