津波越流に対する防波堤マウンド被覆ブロックの所要質量算定法

（株）不動テトラ　　正会員　○三井　順
（株）不動テトラ　　正会員　　菅　章吾
（株）不動テトラ　　正会員　　丸山　草平
（株）不動テトラ　　　　　　　青田　徹
（株）不動テトラ　　正会員　　松本　朗
（株）不動テトラ　　正会員　　錦織　和紀郎

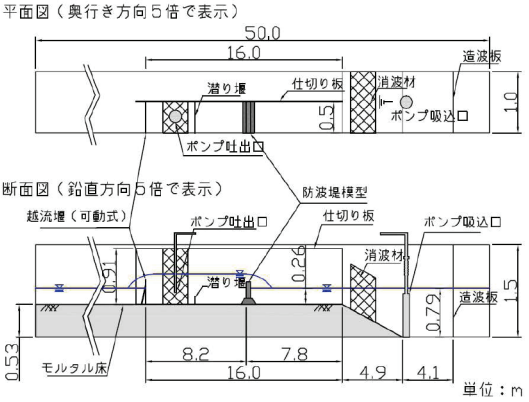
１．はじめに

東北地方太平洋沖地震は多くの防波堤に被災をもたらした．その原因の一つは津波の越流による基礎マウンドや海底地盤の洗掘であった．防波堤の粘り強さを確保するためには，港内側マウンドを腹付石で嵩上げすることが有効である．しかしながら，津波に対する港内側マウンド被覆材の安定性に関する研究は端緒についたばかりであり，被覆材の形状と耐津波安定性の関係については明らかとなっていない．また，今後の防波堤の耐津波設計においては津波の規模に応じた適切なブロックの質量を簡便に算定する必要があるが，有効な照査方法は確立されていない．防波堤の耐津波設計ガイドラインには，CERC（1977）のいわゆるイスバッシュ式が記載されている．この式では所要質量は流速の６乗に比例するため，被覆材近傍の流速を精度良く算定することが重要であるが，流速の取り方にあいまいな部分がある．また津波越流による局所的に速い流れが被覆材に作用するような状況は，本来イスバッシュ式が対象とする現象とは異なる．そこで本研究では，はじめに孔なしと孔ありの２種類の被覆ブロックおよび消波ブロックを用いた安定実験を行い，被覆材の形状と耐津波安定性の関係を検討した．次に，得られた実験結果を基に，簡便で精度の高い所要質量算定方法を提案した．

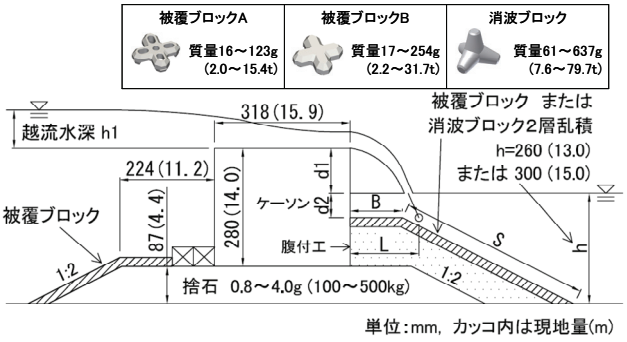
２．水理実験

２．１　実験方法

二次元造波水路の一部を幅方向に２つに仕切り，手前側の幅 50cm の水路内に防波堤模型を設置した（図－１参照）．津波は，水中ポンプにより定常的な越流を再現し，津波の高さは防波堤模型の港外側に設置した越流堰の高さを変えることで調整した．模型縮尺は 1/50 を想定しており，津波の継続時間は現地量で 15 分間（模型量で約２分間）とした．検討対象とした防波堤断面図とブロックの諸元を図－２に示す．腹付工の有無，腹付工天端幅，港内側水位，被覆材の種類・質量を変えて実験を行った．実験では小さい津波から 1cm 刻みで越流水深を上げていき，安定限界を調べた．詳細は三井ら（2013）を参照されたい．



図－１　実験装置



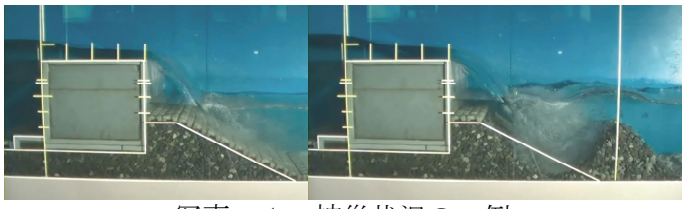
図－２　防波堤断面図

２．２　実験結果

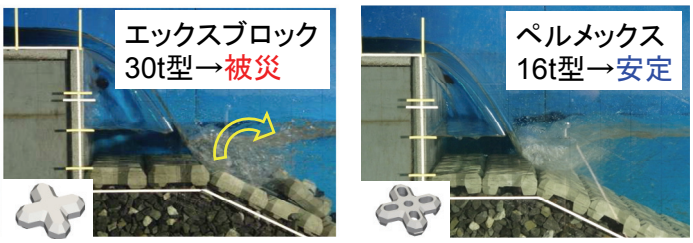
写真－１は被災状況の一例である．法面の被覆ブロックが被災すると急激に被害が進行し，ブロック被災の約１

キーワード　模型実験，越流水深，腹付け，天端幅，港内側水位，被災形態
連絡先　〒300-0006　茨城県土浦市東中貫町 2-7　（株）不動テトラ　総合技術研究所　ＴＥＬ029-831-7411

分後（現地量で約 7 分後）にはモルタル床までマウンドの洗掘が進行している．腹付工によって洗掘される時間を稼いでいるものの，被覆ブロックが被災し捨石が露出すると急激に洗掘が進行するという被災形態は津波越流による被災の特徴の一つである．



写真－１　被災状況の一例

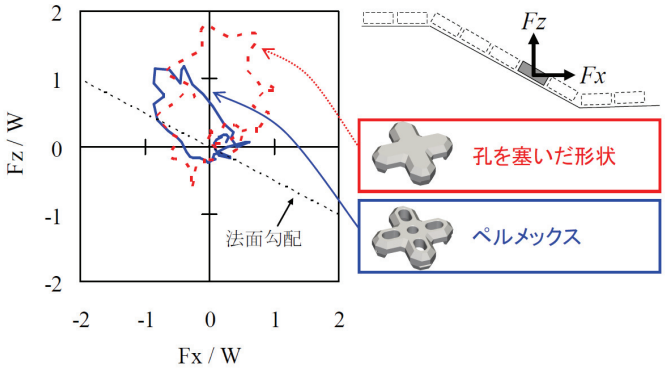


写真－２　被覆ブロックの被災状況
（左側：孔なし，右側：孔あり）

２．２．１　被覆ブロックの特徴

写真－２は被覆ブロックの被災状況の一例を示すものである．左側は孔なしの 30t 型，右側は孔ありの 16t 型ブロック（開口率 23.5%）であり，天端 2 個並びである．津波の越流水深は 2.5m であり，ケーソンを越流した水塊は法肩に打ち込んでいる．このケースでは孔なしブロックは法面最上段のブロックが黄色の矢印で示した方向にめくれて被災した．一方孔ありのブロックは，質量が孔なしの 1/2 程度であるにもかかわらず被害は生じなかった．

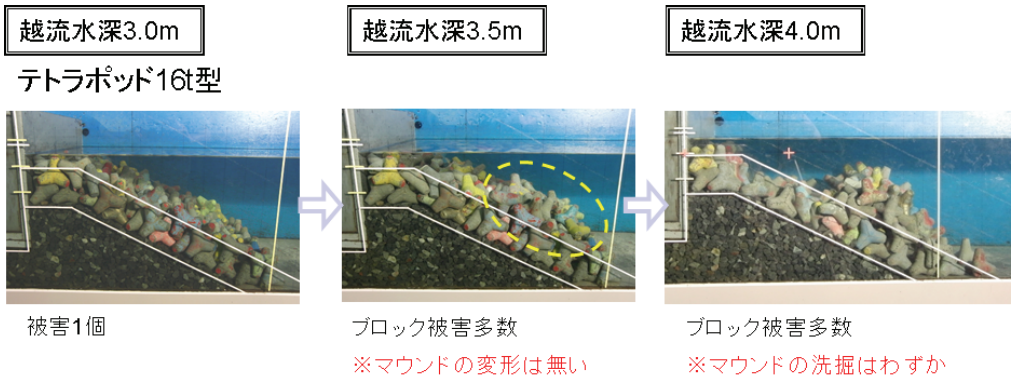
孔ありブロックは防波堤の港外側マウンドや人工リーフでの使用を想定して開発されたものであり，5 つの孔により揚圧力を効果的に軽減できる形状であるが（浜口ら，2007），津波の越流に対しても有効であることが示された．この孔の効果に関しては数値解析でも検討した．一山の津波が防波堤を越流するときにブロックに作用する流体力の計算を行った．図－３は越流直後に発生した渦がブロックの上を通過する時間帯の流体力のホドグラフを示したものである．流体力はそれぞれのブロックの水中重量で無次元化されている．孔あきブロックは法面から離脱する方向の流体力が小さいことがわかる．（三井ら，2012）



図－３　流体力のホドグラフ

２．２．２　消波ブロックの特徴

消波ブロック被覆の場合，越流水深がブロックの安定限界を超えてブロックが多数被災した場合でもマウンドが急激には洗掘されにくかった．これは，2 層で被覆しているため捨石が露出するまでに時間がかかることと，離脱したブロックが打ち込み位置の背後に堆積した際にブロックのかみ合わせによりその場所に留まることで，被害の進展が比較的遅いためである（写真－３）．洗掘の進行を緩やかにすることは，防波堤の粘り強さの観点から重要であり（有川ら，2013），消波ブロック構造はそのような粘り強さを有していると言える．



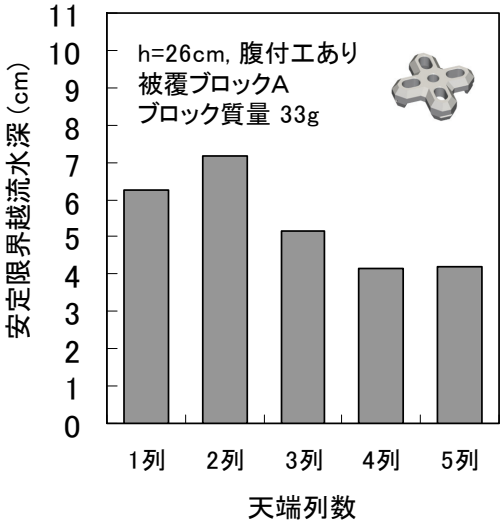
写真－３　消波ブロックの被害の進展

３　所要質量算定方法

３．１　マウンド被覆材の耐津波安定性に影響する要因

３．１．１　越流水塊の打ち込み位置の影響

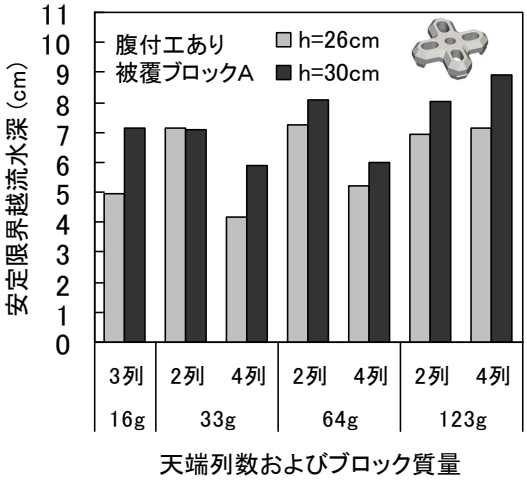
図－４は腹付工の天端幅を変化させたときの安定限界越流水深を示している．図に示した条件では斜面部に打ち込む天端１列および２列の条件は，天端部に打ち込む天端４列および５列の条件よりも安定性が高くなっていることがわかる．ただし打ち込み位置の影響は被覆材の種類や腹付工の有無などの構造条件によって変わるため，所要質量の算定にあたっては打ち込み位置の影響を適切に取り込む必要がある．



図－４　天端幅の影響

３．１．２　港内側水位の影響

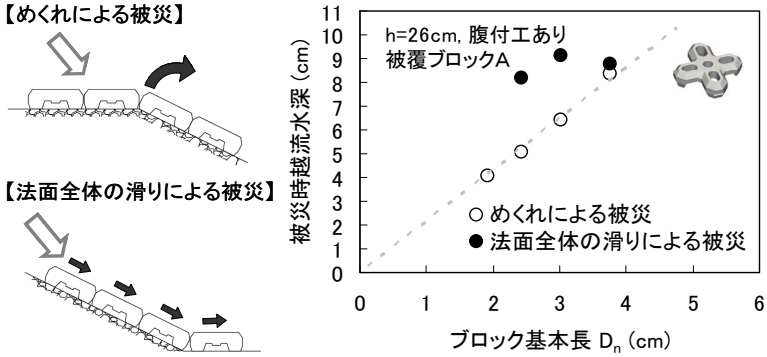
越流水がケーソン後端から放出されて被覆材に打ち込むまでの過程を考えると，放出時から水面までの空中部は自由落下により水塊の速度が加速され，水面から被覆材に打ち込むまでの水中部は越流水の拡散により減速される．したがって，空中部の距離が大きく水中部の距離が小さいほど安定性は低下する傾向となると考えられる．図－５は港内側水位を変化させたときの安定限界越流水深を示している．条件によらず，港内側水位が高い方が安定性が高い事が確認された．



図－５　港内側水位の影響

３．１．３　ブロックの被災形態

被覆ブロックの被災形態は，打ち込み位置付近がめくれ上がる被災と，法面全体が滑る被災に大別された．図－６に示すようにめくれによる被災の場合，安定限界越流水深は概ねブロック基本長 Dn（ブロック体積の３乗根）に比例した．一方，法面全体が滑る被災形態については，安定限界越流水深はブロック質量にはあまり依存しない結果であった．消波ブロックについては殆どのケースで打ち込み位置から離脱していく被災形態であった．

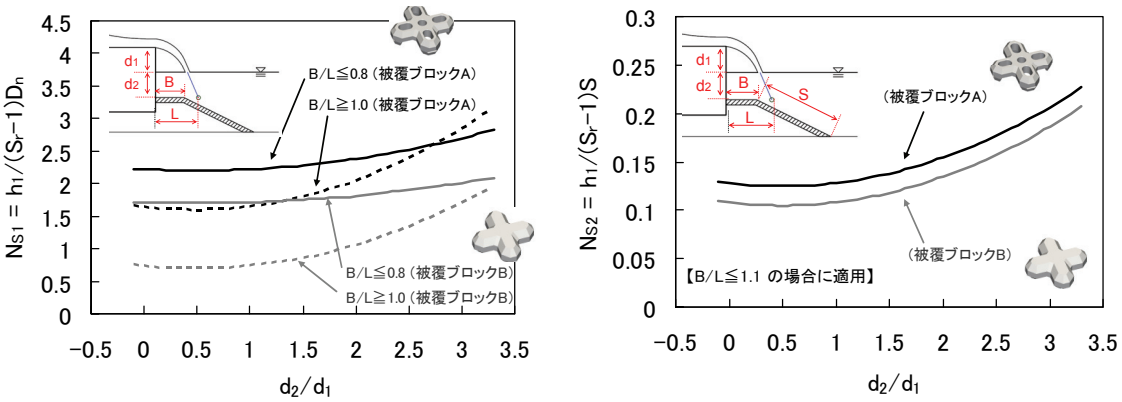


図－６　ブロック基本長と被災時越流水深

３．２　所要質量算定図の提案

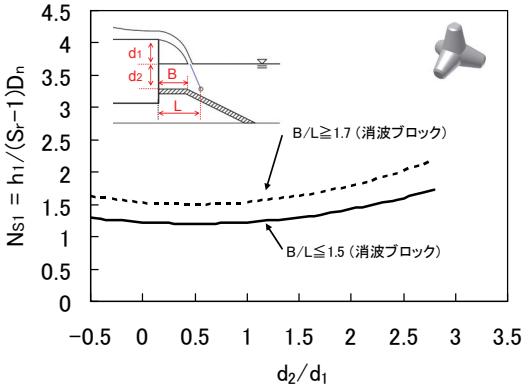
上に述べた要因を踏まえて作成した所要質量算定図を図－７，８に示す．いずれも，設計条件から図中にプロットされる点と安定性を示すカーブの位置関係によりブロックの耐津波安定性を判定するものである．カーブの下であれば安定，上であれば不安定と判定される．詳しくは三井ら（2013）を参照されたい．図－７は被覆ブロックの算定図であり，（ａ）はめくれに対する算定図である．B/L で場合分けしており，B/L が 0.8～1.0 の間は線形補間して用いる．また，（ｂ）は法面の滑りに対する算定図であり，天端部に打ち込む条件では法面の滑りは発生しないので，法面の滑りに対する検討は B/L≦1.1 の場合のみ行うこととする．図－８は消波ブロックの算定図である．消波ブロックは法面の滑りに対する検討は行わない．消波ブロックの場合，打ち込

み位置の影響が被覆ブロックの場合と異なり，天端部に打ち込む条件の方がやや安定性が高い傾向にあったため，その傾向を反映させた．



(a)　めくれに対する安定数 N_{S1}　　(b)　法面の滑りに対する安定数 N_{S2}

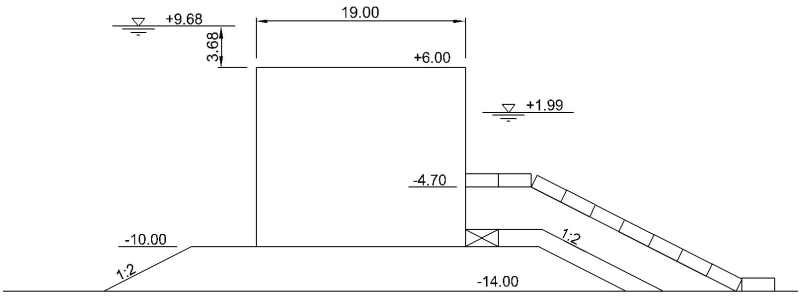
図－７　被覆ブロックの安定数算定図



図－８　消波ブロックの安定数算定図

４．設計計算例

対象とした防波堤の諸元を図－９および表－１に示す．津波の越流水深は 3.68m である．港内側にケーソン高さの 1/3 の厚さの腹付けマウンドを構築し被覆ブロックＡで被覆する．この際に，２，４，８，１６ｔ型のブロックの安定性を図－７の安定数算定図を用いて検討する．



図－９　防波堤断面図

表－１　基本寸法

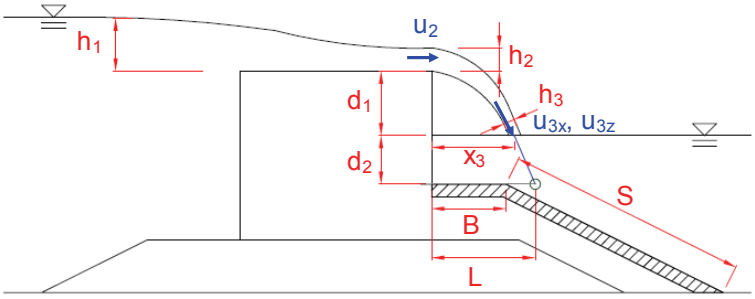
防波堤天端高D.L.(m)	+6.00			
港内側マウンド天端高D.L.(m)	-4.70			
地盤高D.L.(m)	-14.00			
被覆ブロックトン型	2t型	4t型	8t型	16t型
被覆ブロック天端高D.L.(m)	-4.03	-3.86	-3.64	-3.37

表－２は安定数算定図の使用に当たり必要となる諸数値（d_1，d_2，S，B，L）をまとめたものである．d_1，d_2，S，B は断面寸法であり，図－９から直接読み取ればよい．打ち込み位置 L は以下の諸式から求める．すなわち，越流堰の公式より h_1 から h_2 を求め，港内側の打ち込み軌跡は水面までは放物線，水中は直線とするものである．図－10 に記号の意味を示す．

$$
\begin{aligned}
q &= 0.35h_1\sqrt{2gh_1} \\
h_2 &= 0.45h_1 \\
u_2 &= q / h_2 \\
x_3 &= u_2\sqrt{2(d_1 + h_2/2)/g} \\
u_{3x} &= u_2 \\
u_{3z} &= \sqrt{2g(d_1 + h_2/2)} \\
L &= x_3 + (u_{3x}/u_{3z})d_2
\end{aligned}
$$

表－２　諸数値（d_1，d_2，S，B，L）の算出

越流水深 h_1 (m)	3.68			
港内側水面からケーソン天端までの高さ d_1 (m)	4.01			
港内側マウンド天端から水面までの高さ d_2 (m)	6.02	5.85	5.63	5.36
マウンド斜面長 S (m)	22.29	22.68	23.16	23.77
マウンド天端幅 B (m)	3.77	4.73	5.93	7.45
越流流量 q (m^3/s･m)	10.94			
ケーソン港内側端での水深 h_2 (m)	1.66			
ケーソン港内側端での水平流速 u_2 (m)	6.61			
水面打ち込み距離 x_3(m)	6.56			
水面打ち込み水平流速 u_{3x} (m/s)	6.61			
水面打ち込み鉛直流速 u_{3z} (m/s)	9.74			
打ち込み位置 L (m)	10.65	10.53	10.38	10.20

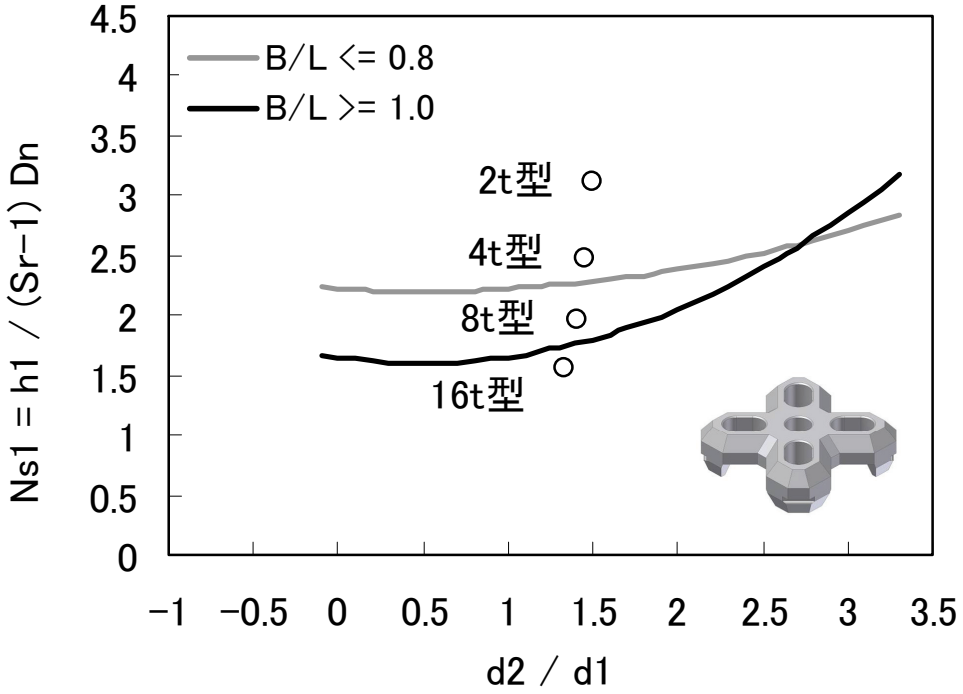


図－10　打ち込み位置算定の模式図

以上求めた安定数算定に必要な諸数値を使用して，安定性を判定することが出来る．表－３，図－11 は，めくれに対する安定性の照査結果である．条件に応じた点を図-11 にプロットし，プロットされた点が算定宣の下側にあれば安定，上側にあれば不安定となる．図中で B/L に応じた算定線が２本描かれているので，条件によって使い分ける．今回の検討ではどのトン型のブロックでも B/L は 0.8 よりも小さいので，灰色の線と比較することになる．２，４ｔ型のブロックは線の上にプロットされているので不安定，８，１６ｔ型のブロックは線の下にプロットされているので安定となる．

表－３　めくれに対する安定性照査結果

トン型	2t型	4t型	8t型	16t型
B/L	0.35	0.45	0.57	0.73
d_2/d_1	1.50	1.46	1.40	1.34
$h_1/(S_r-1)D_n$	3.10	2.47	1.96	1.56
判定（めくれ）	×	×	○	○

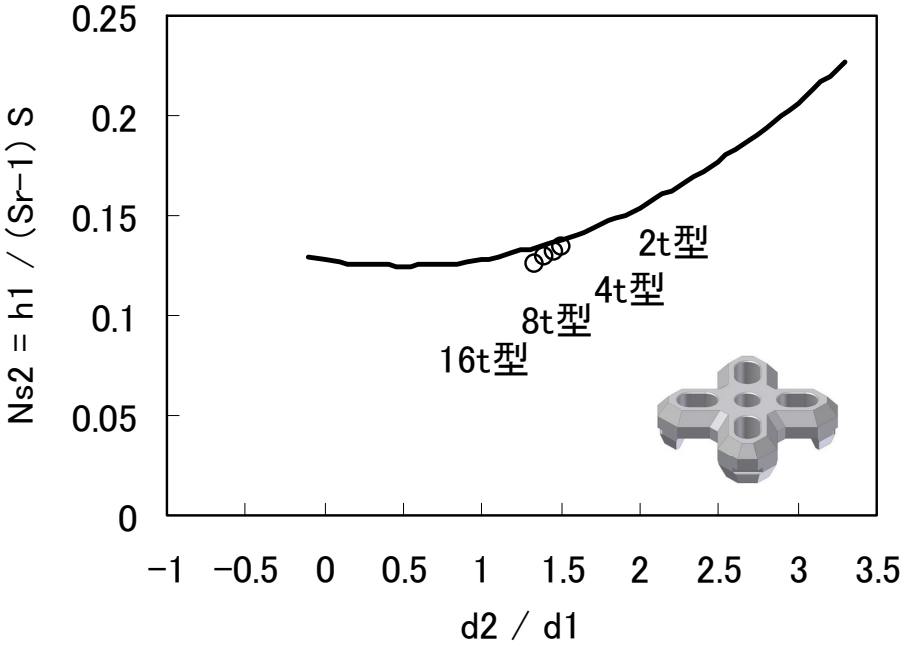


図－11　めくれに対する安定性照査結果

表－４，図－12 は，滑りに対する安定性の照査結果である．めくれに対する照査と同様に条件に応じた点をプロットし，プロットされた点が算定線の下側にあれば安定，上側にあれば不安定となる．今回の検討では全てのトン型のブロックが線の下にプロットされており安定となる．めくれ，滑りの双方の被災パターンについて安定であることが必要であるため，総合判定としては８ｔ型か１６ｔ型のブロックが必要となる．

表－４　滑りに対する安定性照査結果

トン型	2t型	4t型	8t型	16t型
B/L	0.35	0.45	0.57	0.73
d_2/d_1	1.50	1.46	1.40	1.34
$h_1/(S_r-1)S$	0.13	0.13	0.13	0.13
判定（めくれ）	×	×	○	○
判定（滑り）	○	○	○	○
判定（総合）	×	×	○	○



図－12　滑りに対する安定性照査結果

５．むすび

本研究では，はじめにブロックの形状と耐津波安定性の関係について検討した．被覆ブロックでは開口部による揚圧力の軽減が耐津波設計上重要であること，消波ブロックは粘り強く効果を発揮することがわかった．また，ブロックの津波越流に対する簡便な安定性照査方法を提案し設計計算例を示した．この技術は今後の防波堤の耐津波設計に寄与するものと思われる．

参考文献

国土交通省港湾局：防波堤の耐津波設計ガイドライン，平成 25 年 9 月，2013.

有川太郎・佐藤昌治・下迫健一郎・富田孝史・廉慶善・丹羽竜也（2013）：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. 1269，37p.

浜口正志，久保田真一，松本朗，半沢稔，山本方人（2007）：大きな開口部を有する新しい被覆ブロックの開発と人工リーフへの適用，海岸工学論文集，第 54 巻，pp. 961-965.

三井順・丸山草平・松本朗・半沢稔（2012）：防波堤を越流する津波に対する港内側マウンド被覆材の安定性

に関する研究，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.68，No.2，pp.I_871-I_875.
三井順・松本朗・半沢稔・灘岡和夫（2013）：防波堤港内側マウンド被覆材の津波越流に対する安定性照査方法の提案，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.69，No.2，pp.I_956-I_960.
Coastal Engineering Research Center: Shore Protection Manual, U.S.Army Corps of Engrs., U.S.Govt. Printing Office, Vol. II, pp.7_213-7_216, 1977.