

斜め入射波に対する混成堤マウンド被覆材の安定重量算定法

高橋重雄*・木村克俊**・谷本勝利***

1. ま え が き

我が国の主要な防波堤は、捨石マウンド上にケーソンなどの直立部を据え付けた混成堤である。直立部の設計法はほぼ確立した段階にあり、近年の被災統計をみても直立部のみが滑動するケースは年々減少している。ただし、これにかわって捨石マウンドの散乱等が要因と考えられる被災例が目立ってきている。被災例の中には、斜め入射波による直立部基部の洗掘、あるいは堤頭部（防波堤の先端部）における被覆材の散乱などのように、平面的な影響を考慮すべき事例が多く含まれている。

マウンド被覆材の安定性に関しては、波の入射角や防波堤の平面形状（堤頭部や堤幹部の違いや法線形状）による安定性の違いは未解明で、経験に基づいて設計されているのが現状である。本報告はこうした平面的な条件に対するマウンド被覆材の安定性について簡単な理論的検討を行うとともに、平面模型実験を実施して平面的な影響を明らかにし、安定重量の算定法を提案するものである。

2. マウンド近傍流速と被覆材の安定重量

(1) 安定重量算定の基本式

混成堤のマウンド被覆材の安定重量は、式(1)により算定できる。

$$W = \frac{\gamma_r H_{1/3}^3}{N_s^3 (S_r - 1)^3} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 W ；被覆材の安定重量 (tf)、 γ_r ；被覆材の空中単位体積重量 (tf/m³)、 S_r ；被覆材の海水に対する比重、 $H_{1/3}$ ；設計計算に用いる波高（一般には有義波高）(m)、 N_s ；波の諸元、マウンドの形状、被覆材の特性等によって決まる係数（安定数）である。

この式は Hudson (1959) が斜面被覆材の安定性に関して示した式で、Brebner・Donnelly (1962) によって直立壁の基礎マウンドの安定重量算定式として用いられ

て以来、広く一般に用いられるようになった。ただし、式(1)を用いて適切な重量を得るには、マウンドの形状や入射波の条件を考慮して安定数 N_s を与えることが重要である。

谷本ら (1982) は、堤幹部で波が正面から入射する場合の被覆石（2層積み）の安定数 N_s の算定式を、不規則波実験結果に基づいて次のように提案している。

$$N_s = \max \left\{ 1.8, 1.3 \frac{1 - \kappa}{\kappa^{1/3}} \frac{h'}{H^{1/3}} + 1.8 \exp \left[-1.5 \frac{(1 - \kappa)^2}{\kappa^{1/3}} \frac{h'}{H^{1/3}} \right] \right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\kappa = \kappa_1 \cdot (\kappa_2)_0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\kappa_1 = \frac{2kh'}{\sinh 2kh'} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$(\kappa_2)_0 = \sin^2 k B_M \quad \dots\dots\dots (5)$$

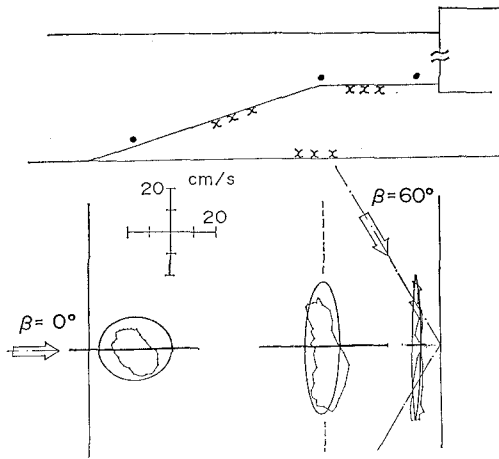
ここで、 h' ；基礎捨石マウンドの天端の水深 (m)、 $H_{1/3}$ ；設計有義波高 (m)、 L' ；水深 h' での設計有義周期に対する波長 (m)、 B_M ；基礎捨石マウンドの前肩幅 (m)、 k ；波数 ($2\pi/L'$) である。

κ はマウンド近傍の無次元流速（ピーク値）であり、谷本の式は安定数 N_s をマウンド近傍流速の関数として表したことに特徴がある。ただし式(3)～(5)は直角入射における堤幹部の無次元流速である。この方法を斜め入射の場合や堤頭部に適用するためには、式(2)中の無次元流速 κ を入射波の波向きや堤頭部の条件に応じて適切に与え、安定数 N_s を求める必要がある。

(2) 堤幹部における波向きの影響

堤幹部では、波向きによって直立部前面での水粒子の運動パターンが異なる。図-1 は、微小振幅波理論によって計算した水粒子速度の時間変化（ホドグラフ）である。直角入射の場合には、水粒子は法線直角方向に往復運動し、その振幅は重複波の節に近づくほど大きくなる。これに対し斜め入射の場合には、水粒子速度の時間変化は橢円軌道となり、流速は直立壁の直前では壁に沿う成分が卓越し、壁から離れるにつれて防波堤法線に直角方向の成分が大きくなる。図-1 には入射角 β （法線直角方向と成す角）が 60° の場合の、電磁流速計によるマウンド近傍流速の測定結果も示しているが、発生流速

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 水工部 耐波研究室長
 ** 正会員 北海道開発局開発土木研究所 水工部 主任研究員
 （元運輸省港湾技術研究所 水工部 耐波研究室）
 *** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 水工部長

図-1 水粒子速度の時間変化 ($T=1.64$ s, $H=10$ cm)

は理論値にはほぼ一致している。

次に示す κ は、微小振幅波理論による堤幹部での無次元流速であり、波向きの影響を含んだものである。

$$\kappa = \kappa_1 \cdot (\kappa_2)_B \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$(\kappa_2)_B = \max \{ \alpha_s \sin^2 \beta \cos^2 (kl \cos \beta), \cos^2 \beta \sin^2 (kl \cos \beta) \} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 β は波の入射角、 l は直立壁から対象となる点までの距離である。 α_s は後述する補正係数である。式(7)の $(\kappa_2)_B$ は β の値によって異なり、 $\beta=0^\circ$ で $l=B_M$ においては、すでに示した式(5)の $(\kappa_2)_0$ に α_s を乗じた値に一致する。式(7)の第1項および第2項は、それぞれ法線方向および法線直角方向の流速のピーク値に対応している。なお、直角入射波に対する安定数は法肩から斜面部の被覆材を算定対象としたものであり、斜め入射波の場合は水平部の被覆材が対象となることに留意しなければならない。ただし、対象が法肩や斜面部であっても、法線方向の流速成分に対しては流れの方向に勾配は存在しないので水平面の流速に対しては被覆材の安定性が向上すると考えられ、補正係数 α_s を導入し $(\kappa_2)_B$ を小さくした。 α_s は後述するように 0.45 としている。

(3) 堤頭部における発生流速

堤頭部はマウンドの洗掘が発生しやすい部分であり、これが原因となって直立部の沈下や倒壊が生じた例もみられる。ここでは堤頭部近傍で発生する流速の特性を実験結果に基づいて検討する。なお、実験模型については次の章で説明する。

図-2 の上側は、直角入射の場合の堤頭部のマウンド近傍流速(ピーク値)のコンター図の一例である。波の条件は規則波で、 $T=2.92$ s, $H=10.0$ cm である。堤頭部近傍では、沖側および岸側の角を中心として局所的に速い流れが発生している。その絶対値は岸側の角部の

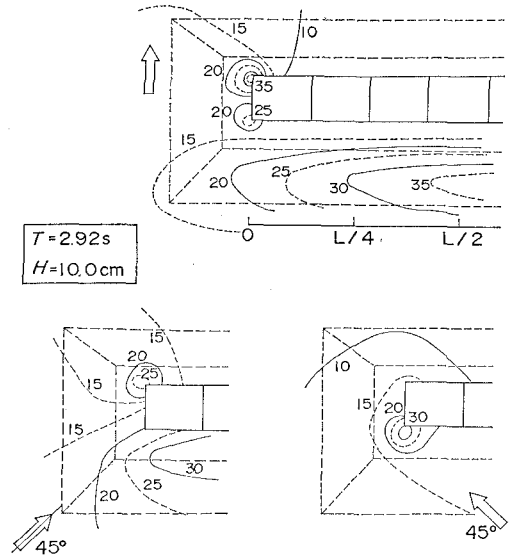


図-2 マウンド近傍の流速分布

ほうが大きく、堤端から法線方向に $L/2$ 程度離れた堤幹部でのマウンド近傍流速とはほぼ一致している。同図の下側には同じ条件に対して波向きを変化させた実験結果が示してある。これによると斜め入射の場合には、波向き線に対して突き出た側の角部での局所流の発生が特に顕著になることがわかる。

無堤時の進行波の水粒子速度のピーク値 U_{P0} は、微小振幅波理論によって次式で求められる。

$$U_{P0} = \frac{\pi H}{T \sinh kh'} \quad \dots\dots\dots (8)$$

堤頭部での流速 U_T から求められる無次元流速 κ_T は、 U_T/U_{P0} の値を τ とおくことにより次式で表される。

$$\kappa_T = \kappa_1 \cdot (\kappa_2)_T \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$(\kappa_2)_T = \frac{\alpha_s \tau^2}{4} \quad \dots\dots\dots (10)$$

なお、 α_s は対象となる位置が水平床である場合の補正係数である。式中の τ の値は、実験によって得られた流速の平均的な値に着目すると、1.2~1.5 程度の値となった。ただし安定重量の算定においては $\tau=1.4$ を採用している。なお高橋ら(1990)は、数値波動解析法による計算を行って堤頭部での発生流速を求め、 τ の妥当性を確認している。

(4) 堤頭部における流速の大きい範囲

すでに示したように、流速が大きい範囲は角部近傍に限られた部分であり、それ以外の堤頭部のマウンドに作用する流速は小さい。図-3 は規則波による流速分布の測定結果を用いて、進行波の流速のおよそ 1.2 倍以上となる早い流れの発生範囲を示したものである。ただし、速い流れの範囲を半径 ϕ の円で表すこととした。縦軸は早い流れの範囲の半径 ϕ をとり、横軸に波高 H を

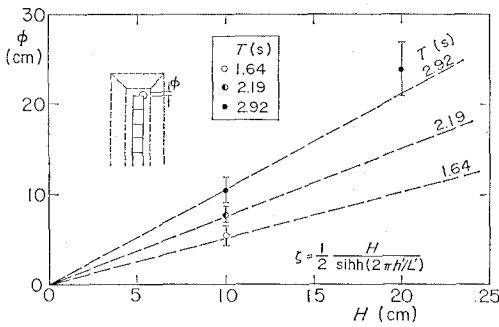


図-3 流速の大きな範囲

として示している。なお図中の実線は、次式で示される微小振幅波理論による進行波の水粒子の最大変位距離 ζ である。

$$\zeta = \frac{H}{2 \sinh(2\pi h'/L')} \quad \dots\dots\dots (11)$$

この図からわかるように、実験値 ϕ は同じ波高に対しては周期が長いほど大きい傾向があり、式(11)により求めた ζ の傾向とよく一致する。

3. マウンド被覆材の安定性

(1) 実験方法

実験は長さ 50 m、幅 20 m の平面水槽で実施した。水槽の底面は造波機の前面から 5 m 区間を 1/10 勾配、それ以外を 1/50 勾配とした。実験では防波堤模型の配置を変えることにより、入射角 β を 0° 、 45° および 60° の3種類に変化させている。防波堤の模型は、短い周期の実験波に対しては波長のおよそ5倍、長い周期の場合でも波長の2倍程度の長さを再現した。

図-4は、堤体模型の標準断面図で、水深は $h=65$ cm、 $h'=45$ cmで、マウンド前肩幅 $B_M=40$ cmである。今回の実験では比較的马ウンドの低い混成堤を対象とし、マウンド上の水深と前面水深との比 d/h は0.69である。斜め入射の場合には法線方向に水深が変化するけれども、マウンドの厚さを調整し、ケーソンの基面水深および天端高さを一定とした。マウンド被覆材はすべて碎石とし、平均重量がおよそ 15, 30, 50 および 100 gf の4種類を用意した。被覆材はすべて2層積みとし、表

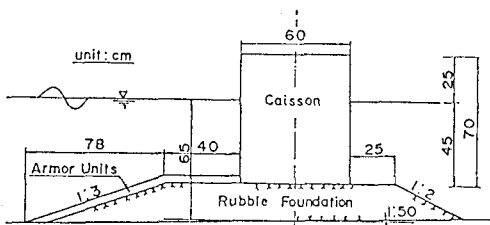


図-4 実験模型の標準断面

面に極端な凹凸がない程度に積んでいる。

安定実験はすべて不規則波により実施した。実験では順次大きな波高の波を作用させるが、波高レベルを変更する際に被覆材の並べ換えは行わず、移動個数は累加していった。検査域は原則として一辺が 20 cm の正方形の格子状に分割し、格子ごとに色の異なる被覆材を配置している。観察は目視で行い、各格子ごとに格子外への移動個数を数えている。移動率は各格子に属する被覆材の総数に対する移動個数の比で定義した。

実験波の周期は、1.64 s、2.19 s および 2.92 s の3種類とし、波高は非砕波領域に限定した。不規則波のスペクトル形状は修正ブレットシュナイダー・光易型とし、作用波数はどの周期に対してもおよそ 150 波を標準とした。なお今回の実験条件は、 $h/L=0.08\sim 0.15$ 、 $H_{1/3}/h=0.08\sim 0.35$ である。

(2) マウンド被覆材の移動状況

図-5は、 $T_{1/3}=2.92$ s、 $H_{1/3}=17.5$ cm の波を作用させた後のマウンド被覆材の移動状況を、波向きごとに示したものである。図中の黒丸は被覆材の移動位置である。まず、堤幹部についてみると、移動位置は既示した流速分布の傾向とよく一致し、直角入射の場合にはマウンドの法肩から斜面部、斜め 60° 入射の場合は直立壁の前面の水平部となっている。斜め 45° 入射の場合は斜面部と直立壁の前面で同じ程度の移動が認められる。

一方堤頭部については、直角入射では岸側、斜め 45° 入射では波向きに対して突き出た側の角部での移動が顕著となっており、マウンド近傍流速の大きい部分と移動

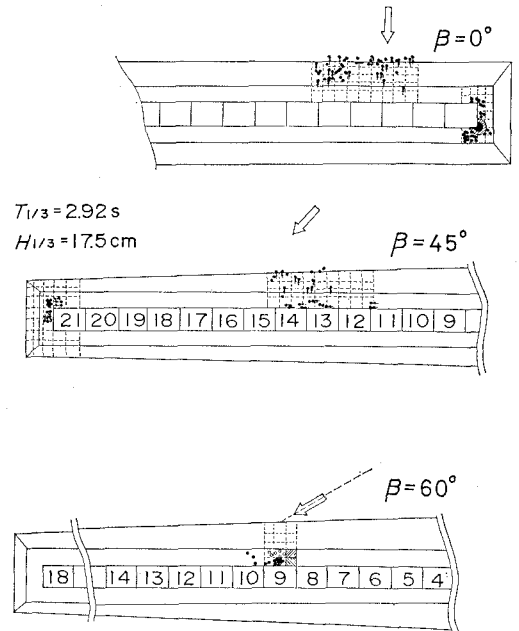


図-5 被覆材の移動状況

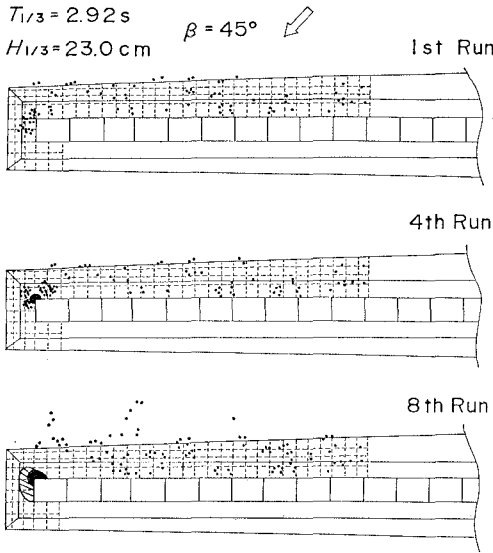


図-6 同一波浪の繰り返しによる被覆材の移動状況

個所が一致する。

図-6 は、斜め入射の 45° の場合について、 15 gf のマウンド被覆材を用いて、安定限界を上回る波を連続して作用させたときの状況である。図中の堤頭部の黒い部分は洗掘領域、斜線の部分は堆積領域を示している。実験波は $T_{1/3} = 2.92 \text{ s}$ 、 $H_{1/3} = 23.0 \text{ cm}$ とし、これを連続して8回、合計1200波作用させたときの状況である。実験結果によると堤幹部では移動範囲が広く分散し、移動の進行が遅いことがわかる。これに対し堤頭部では移動が端部の周辺に集中し、作用波数の増加とともに洗掘が進行する傾向がある。

図-7 は堤幹部における波向きごとの移動率 D を、横軸に入射波高をとって示したものである。なお、波の周期は $T_{1/3} = 2.92 \text{ s}$ である。直角入射と斜め 45° 入射の場合は傾向が良く似ており、波高に対する被覆材移動の進行は遅い。これに対して斜め入射の 60° の場合は小さな波高で移動が始まり、移動量が大きい傾向がある。

(3) 安定重量の実験値と計算値の比較

図-8 は、 $T_{1/3} = 2.92 \text{ s}$ の場合について、堤幹部における波高と安定限界重量の関係を、波向きごとにプロッ

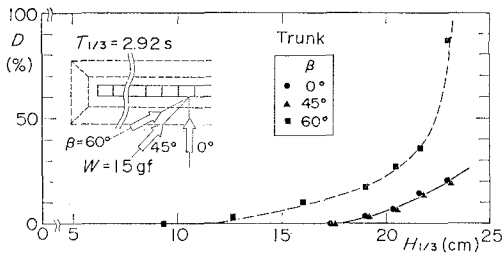
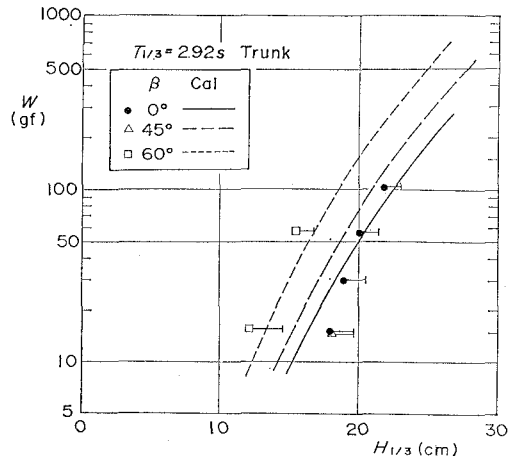
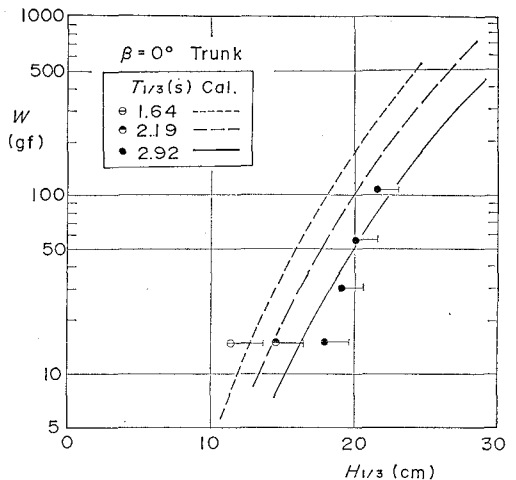


図-7 波の入射角の影響 (堤幹部)

トしたものである。プロットした点は移動限界を示し、横線の右端は移動率 5% を示している。また図中の曲線は各条件に対して今回提案した方法で求めた計算値であり、実験値とおおむね一致している。ただし、計算ではマウンド面の勾配に関する補正係数 $\alpha_s = 0.45$ を用いている。計算結果では $\beta = 60^\circ$ の場合、 $\beta = 0^\circ$ の場合に比べて堤幹部での安定重量が約3倍である。ただし、一般に直立壁付近には重量の大きい根固めブロックが置かれている。このように斜め入射の場合で入射角が大きいときには、直立壁付近で移動し易く、直入射の場合の法肩や斜面以上の重量が必要な場合もあることを注意を要する。また図-9 は、直入射の堤幹部について、周期の異なる場合について計算値と実験値を比較したものであるが、両者はおおむね一致している。

図-10 は、堤頭部について計算値と実験値を比較している。 $T_{1/3} = 2.19 \text{ s}$ の場合では計算値はやや大きい値となるが、 $T_{1/3} = 2.92 \text{ s}$ の場合は計算値は実験値と良く


 図-8 安定限界重量と波高 (堤幹部, $T_{1/3} = 2.92 \text{ s}$)

 図-9 安定限界重量と波高 (堤幹部, $\beta = 0^\circ$)

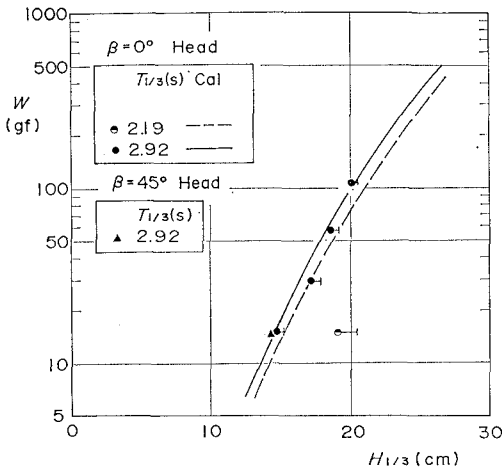


図-10 安定限界重量と波高(堤頭部)

一致している。前出の図-8と比較すると、周期の比較長い $T_{1/3}=2.92\text{ s}$ の場合は堤頭部では堤頭部の約2倍の重量が必要となることがわかる。このように堤頭部の安定重量は周期が長いほど大きいため、これまで経験的に行ってきた堤幹部の50%増しという補正の方法では不十分な場合や、過大となる場合がある。同図には入射角 45° の場合を示してあるが、結果は直角入射の場合と差がない。このことから今回提案した堤頭部の算定法に関しては斜め入射の 45° 程度までは適用可能と考えられる。

(4) 現地被災例との比較

服部ら(1984)によると、1973~82年のケーソン式混成堤(消波ブロック無し)の被災例のうち、マウンド部の被災を含むものは全体の42%になっている。図-11はマウンド被覆石の被災例を分析したものである。横軸は現地重量 W と計算による安定重量 W_c の比で、縦軸はマウンド部の断面欠損率 D_e であり、波向きにより記号を違えてある。斜め入射の被災例はわずか4例に過ぎないが、斜め入射 60° と推定される図中Cの場合は、ケ

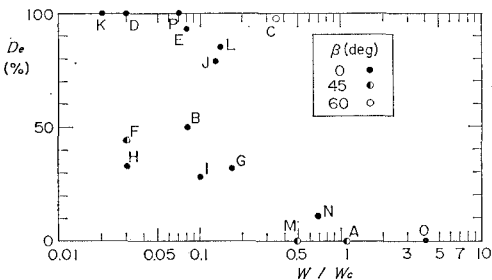


図-11 現地被災例におけるマウンド部の断面欠損率

ーソンの直前が大きく洗掘されており、今回の斜め入射波の実験結果とよく一致している。直角入射波に対しては計算重量のおよそ1/2の場合でも断面欠損率 D_e は10%程度であり、比較的安全側の結果を得る傾向が認められる。これは計算重量が移動率0%に対して設定されたためと考えられる。したがって、防波堤としての機能を損ねない程度のマウンド被覆材の移動を許容できる場合には、計算重量よりも小さなマウンド被覆材の使用も可能と思われる。なお、堤頭部の被災例についても検討したが、今回の算定法で被災をよく説明できることがわかった。特に被災が発生する場所については、実験結果とよく一致することが明らかとなった。

4. 結 論

本研究の主要な結論は以下のとおりである。

- ①斜め入射波に対する堤幹部のマウンド被覆材の安定数 N_s は、式(6)、(7)により計算された κ から式(2)により算定できる。入射角が大きい場合、ケーソン前面のマウンド水平部上の流速が他の場所より速くなり、この部分の被覆材が移動し易い。このため直角入射の場合より安定重量が大きくなることもある。
- ②堤頭部のマウンド被覆材の安定数 N_s は、式(9)、(10)により計算される κ を用い、式(2)により算定できる。堤頭部のマウンド被覆材の安定重量は、有義波周期が長いほど大きく、堤幹部より50%以上の重量が必要な場合もある。また、堤頭部では堤幹部に比べて波高の増大に対するマウンド被覆材の被害が急速に進行する傾向がある。ただし、その被災場所は堤体の角付近に限られている。

参 考 文 献

- 谷本勝利ほか(1982): 不規則波実験による混成堤マウンド被覆材の安定性に関する研究, 港研報告, 第21巻第3号, pp. 3-42.
- 高橋重雄ほか(1990): 斜め入射波による混成堤マウンド被覆材の安定性に関する実験的研究, 港研報告, 第29巻第2号, pp. 3-36.
- 注) 上記論文を参考する際に、以下の点に留意下さい。
- ① pp. 8の式(2)およびpp. 29の式(26)に印刷ミスがあり、両者を本文の式(2)のように訂正する。
 - ② pp. 30の算定例の $(\kappa_2)_B$ の計算で、 $kl \cos \theta$ の部分の $\cos \theta$ が抜けているので、これを加える。
- 服部千佳志ほか(1984): 被災防波堤集覧(その3), 港湾技研資料, No. 485, 281 p.
- Brebner, A. and D. Donnelly (1962): Laboratory study of rubble foundation for vertical breakwater, Proc. of 8th Coastal Engineering Conference, New Mexico City, pp. 408-429.
- Hudson, R. Y. (1959): Laboratory investigation of rubble mound breakwaters, Proc. ASCE, Vol. 85, No. WW3, pp. 93-121.