

中詰式消波構造物に作用する ブロック荷重に関する実験的研究

錦織和紀郎*・山本方人*・根本建治**
宇多高明***・小俣 篤****

1. まえがき

従来型の離岸堤は、一般に消波ブロックを用いて構築されている。しかしながら、このタイプの離岸堤では消波ブロックが沈下したり、高波浪を受けた場合にはブロックが散乱し、周辺の漁場に悪影響を及ぼすことがある。また、大水深域や海底勾配が急な海域では、断面が非常に大きくなると同時に、来襲波高も高くなるので離岸堤の安定性が損なわれる懸念もある。例えば、富士海岸では海底勾配が急で波があまり減衰することなしにブロックに作用するので、離岸堤の散乱発生率が著しく大きくなることが報告されている（宇多ほか、1986）。このような消波ブロックの散乱を防止し、大水深域や海底勾配が急な海域に適用可能な離岸堤の1タイプとして、消波ブロックを透過性の枠体の中に設置する構造物が考えられる。この方式によれば、消波ブロックの安定化および散乱防止が図られ、断面もブロック積離岸堤に比べて小さくなる。そのような構造物の一例を図-1に示す。開口部を有する無底函体（以下、スリットセルラーと称する）に消波ブロックを中詰したものである。

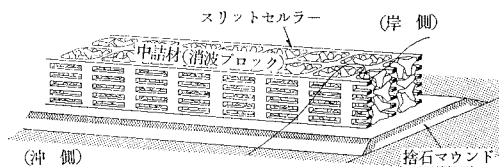


図-1 中詰式消波構造物の概念図

スリットセルラーの水平部材（以下、梁部材と称する）には、波力だけでなく中詰した消波ブロック（以下、中詰材と称する）による水平力が作用する。筆者らは、既に水理模型実験を実施し、このような波力の特性を調べ

てきた（建設省土木研究所、1990）。消波ブロック被覆堤ケーソンを対象とした消波ブロックによる水平力に関しては、廣本ら（1983）、島田（1984）、田中ら（1985）、高橋ら（1989）により研究されており、条件によっては波力に比べて無視できない場合があることが示されている。しかしながら、透過性の枠体に消波ブロックを中詰した構造物の場合、中詰材が梁部材に及ぼす水平力（以下、中詰材水平力と称する）の特性は、消波ブロック被覆堤ケーソンのそれとは異なると考えられるが、このような構造物を対象とした既往の研究例はない。また、既往の消波ブロック被覆堤ケーソンを対象とした研究では、荷重をケーソンに作用する全水平力で評価しているため、鉛直方向の荷重分布は不明である。こうしたことから、本研究では図-1に示す構造物を対象として、中詰材が及ぼす水平力の特性を水理模型実験により検討した。

2. 実験方法

実験には日本テトラポッド応用水理研究所の長さ54m、幅1.2m、高さ1.2mの2次元造波水路を用いた。海底模型および堤体の設置位置を図-2に示す。堤体模型は、高さ32cm、幅56cmであって、測定部分の長さは54cmである（図-3参照）。その両側には同様の構造を持ったダミー堤体を設置した。スリットセルラーはアクリル製であり、捨石マウンド上に固定し、中詰材（現地で6.3t型テトラポッド）はモルタル製とした。最下段の梁部材については、捨石マウンド天端から5mmの間隔を設け、マウンド石の影響を受けないようにした。測定は、沖側スリット壁（以下、前壁と称する）、岸側スリット壁（以下、後壁と称する）別々に行った。

測定項目は、スリットセルラーの梁部材に作用する静水中および波作用中の中詰材水平力と、波作用時における同時差圧（梁部材の表裏に作用する波圧の差）である。中詰材水平力は、図-3、4に示すように梁部材の1スパンを片持ち梁にして、ひずみゲージにより測定されるモーメントから算出した。同時差圧は、図-4に示す梁部材の表裏に設置した波圧計のデータから算出し

* 正会員 工修 日本テトラポッド(株)応用水理研究所
** 正会員 日本テトラポッド(株)応用水理研究所長
*** 正会員 工博 建設省土木研究所海岸研究室長
**** 正会員 建設省土木研究所海岸研究室研究員

4.2 静水中での中詰材水平力の実験結果

静水中における中詰材水平力 P_e の算定に当っては、中詰材と梁部材の接点において集中荷重が作用するものとし、梁部材に接する中詰材 1 個当りの水平力を求めた。ひずみゲージから中詰材と各段の梁部材の接点までの距離を $\ell_i (i=1 \cdots n, n: \text{接点数})$ とし、同じ梁部材の各接点に作用する水平力は等しいと仮定すると、各段の梁部材に作用する P_e は次式より求まる (図-5 参照)。

$$P_e = M_e / \sum_{i=1}^n \ell_i \quad \cdots \cdots (1)$$

ここに、 M_e は中詰材を設置した状態におけるモーメントの実測値である。

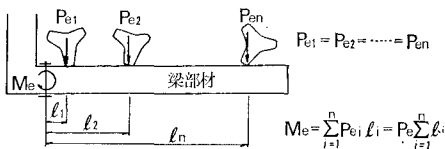


図-5 中詰材水平力の算定方法

静水中で各梁部材に作用する中詰材水平力 P_e の測定結果を図-6 に示す。図-6 より、 P_e は中詰材の設置状態によるばらつきが大きいものの、包絡線は天端から 20 cm 下方まではほぼ単調に増加している。図-6 には、次式で表される消波ブロックによる水平力を土圧とみなした場合の中詰材水平力 P_e の値を併せて示した。

$$P_e = K_s \gamma_B (1 - \varepsilon_B) h_B S_B y \quad \cdots \cdots (2)$$

ここに、 K_s は土圧係数に相当する係数で、テトラポッドの場合島田 (1984) によると 0.42~0.66 で、平均 0.5、廣本ら (1983) によると 0.63 である。また、 γ_B : 中詰材の水中単位体積重量 ($=1.3 \text{ gf/cm}^3$)、 ε_B : 中詰材の空隙率 ($=0.52$)、 y : 堤体天端からの距離、 S_B : 中詰材 1 個の水平支配長さ、 h_B : 梁部材 1 本の鉛直支配長さである。

土圧は分布荷重であるため、本構造物に直接適用でき

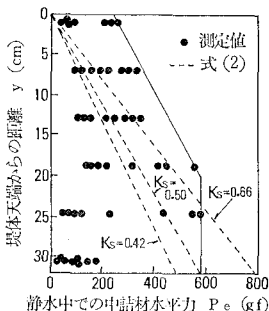


図-6 静水中での中詰材水平力

ない。そこで中詰材水平力 P_e は、梁部材に対する中詰材 1 個の支配面積に作用する土圧の合力に等しいと仮定して計算を進めた。ここに、中詰材 1 個の支配面積は、中詰材 1 個の水平支配長さ S_B と梁部材 1 本の鉛直支配長さ h_B の積とした。 h_B は開口部も含めた長さとした。図-6 より、本実験により得られた P_e の鉛直方向の変化割合は、式 (2) において K_s を 0.5 とした場合にほぼ等しいことが分かる。

消波ブロック被覆堤ケーンを対象とした既往の研究では、消波ブロックによる水平力を土圧と同様とみなしているため、消波ブロックの天端における P_e は 0 である。これに対して、本実験では最上段の梁部材に作用する P_e は 0 にはならない。中詰材は限られた枠内で互いの間隙を埋めるように設置されることから、楔効果が生じ、最上段の梁部材を押し広げようとする力が作用したため上述の結果が得られたと考えられる。また、最下段の梁部材に作用する P_e は、その 1, 2 段上の梁部材の P_e に比べて小さい。最下段の梁部材に接する中詰材は、全て捨石マウンド上に直接設置されたものであるため、水平力の一部は捨石マウンドに伝達され、最下段の梁部材に作用する P_e が小さくなったと考えられる。

4.3 波作用時の中詰材水平力

波作用時の中詰材水平力 P_w も、1 本ごとの梁部材中の各接点で等しいと仮定し、中詰材 1 個当りの量として求めた。このとき、静水中に中詰材を設置した状態を $P_w=0, M_w=0$ とする。ここに、 M_w は波作用時のモーメントである。梁部材に作用する同時差圧 Δp_s が等分布であると仮定すると、 P_w は式 (3) より求められる。

$$P_w = \left(M_w - \frac{1}{2} \Delta p_s b l^2 \right) / \sum_{i=1}^n \ell_i \quad \cdots \cdots (3)$$

ここに、 b : 梁部材の鉛直高さ

l' : 梁部材の自由端からひずみの測定位置までの距離

周期 $T=2.0 \text{ s}$ 、入射波高 $H_i=20 \text{ cm}$ の場合における測定対象壁前面の水位 η (前壁測定の場合 η_f 、後壁測定の場合 η_r)、モーメント M_w 、梁部材に作用する同時差圧 Δp_s および中詰材水平力 P_w の経時変化を図-7 示す。ここに、 M_w は岸向きの力を受けた時に生じるモーメント (以下岸向きのモーメントと称する) を正とし、 Δp_s および P_w は岸向きを正とする。また、 P_w は静水中において 0 である。図-7(a) によれば、前壁の梁部材では、 Δp_s が岸向きに变化する以前においてほぼ 0 となる期間 (図-7(a) 中 τ) にも沖向きのモーメントを示す。これは、この期間 P_w が沖向きに作用しているため、梁が沖向きに曲げられていることを示している。後壁の梁部材では、押し波時の岸向きのモーメント

は、岸向きの Δp_s の増加に伴い増加するが、 Δp_s がピークを過ぎて減少しても M_w の減少は緩やかである。これは、この期間 P_w が岸向きに作用しているためである。このように Δp_s と P_w が位相差をもって梁部材に作用するのは、 Δp_s は波が梁部材に直接作用する場合に発生するのに対し、 P_w は複雑に配置された中詰材を経由して梁部材に作用し、伝達過程が異なるためと考えら

れる。

図-8, 9 は、梁部材に生じるモーメント M_w が、前壁では冲向きに、後壁では岸向きに最大となる時の中詰材水平力の平均強度 p_w と Δp_s の関係を静水の中の中詰材水平力の平均強度 p_e との比で表したものである。図-8 (a), (b) はそれぞれ前・後壁最上段、図-9 (a), (b) は前・後壁5段目の測定結果を示す。ここで、 Δp_s , p_w および p_e は岸向きを正とした。すなわち梁部材を外側に曲げる Δp_s および p_w は、前壁で負、後壁で正である。また、 p_e は、前壁で負、後壁で正である。ここで、 p_w および p_e は式 (4) で定義した。

$$p_w = \frac{P_w}{h_B S_B}, \quad p_e = \frac{P_e}{h_B S_B} \dots\dots\dots (4)$$

前壁最上段梁部材 (図-8 (a)) では、波高が低い場合 ($H_i = 7.8 \sim 9.3$ cm), $\Delta p_s/p_e$ は $-0.1 \sim 0.2$, p_w/p_e は $0.0 \sim 0.4$ の範囲に分布しているのに対し、 $H_i \geq 20$ cm ではデータのばらつきが非常に大きい。 $\Delta p_s/p_e$ と p_w/p_e の最大値に注目すると、 $\Delta p_s/p_e$ は最大で約 0.7 と無視できない値である。しかし、このとき p_w/p_e は負であり、波作用時の中詰材水平力 p_w は p_e と逆向きとなる。これは、 Δp_s の作用により梁部材が外側に曲げられ、中詰材設置時に生じた楔効果が悪くなったためと考えられる。 p_w/p_e は、 $\Delta p_s/p_e$ が 0 付近で約 0.35 の

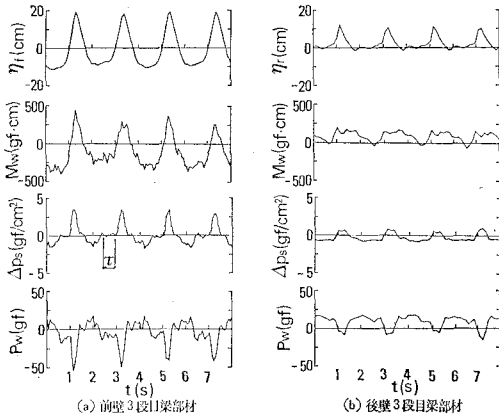


図-7 壁前面の水位 η 、梁部材に生じるモーメント M_w 、同時差圧 Δp_s および波作用時の中詰材水平力 P_w の経時変化 ($T=2.0$ s, $H_i=20$ cm)

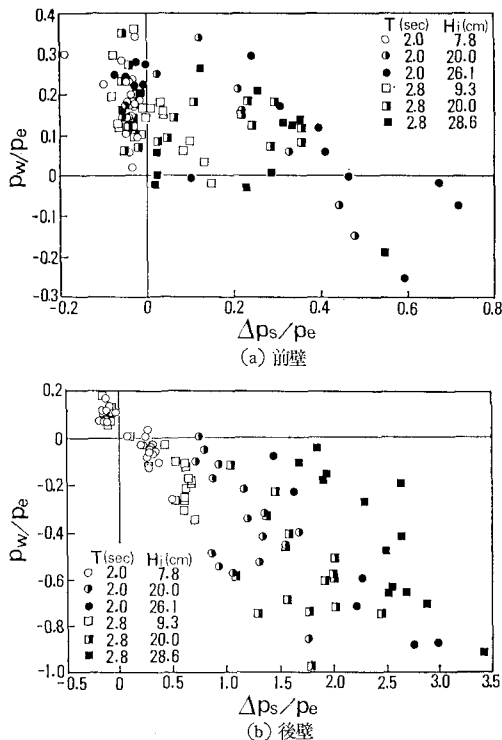


図-8 梁部材に生じるモーメント最大時の同時差圧と中詰材水平力の関係 (最上段梁部材)

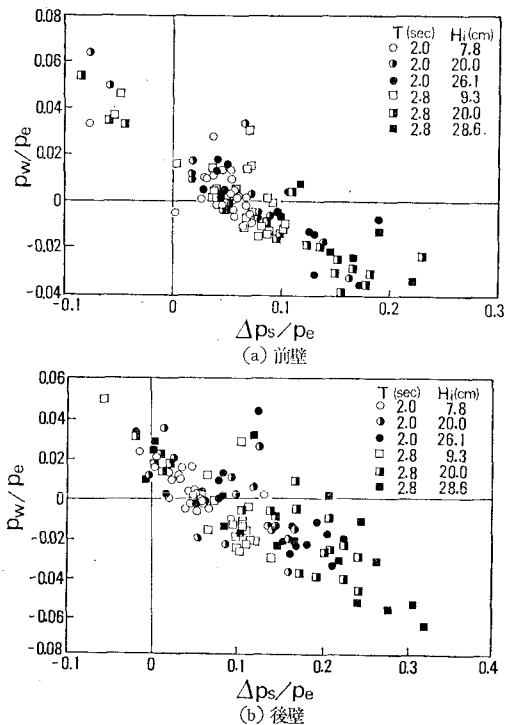


図-9 梁部材に生じるモーメント最大時の同時差圧と中詰材水平力の関係 (5段目梁部材)

最大値をとる。これは、 Δp_s が小さいため楔効果があり弱くならないこと、また梁部材に接する中詰材が水面上に露出し、中詰材に浮力が作用しなくなったことが原因と考えられる。したがって前壁最上段梁部材では、 Δp_s と p_w とが同時に作用して梁部材に大きな影響を及ぼすことはないと言える。後壁最上段梁部材 (図-8 (b)) においては、前壁と異なり、データが $H_i=7.8\sim 9.3\text{cm}$, 20cm および $26.1\sim 28.6\text{cm}$ の波高ランク別に分布し、波高が大きくなるにつれて $\Delta p_s/p_e$ が大きくなる。また、 $H_i\geq 20\text{cm}$ の場合は、 p_w/p_e はほとんどのケースで負であり、 $H_i=7.8\sim 9.3\text{cm}$ においても p_w/p_e は 0.2 以下と小さい。これは、前壁最上段梁部材の Δp_s に比較して後壁では Δp_s が大きいため、楔効果がより弱くなったためと考えられる。5段目梁部材では、前壁 (図-9 (a))、後壁 (図-9 (b)) とともに波高の影響は明瞭でない。しかし、最上段梁部材 (図-8) と比べて図の目盛が十分小さいことが注目される。すなわち、 $\Delta p_s/p_e$ および p_w/p_e の値は最上段梁部材の場合に比べてはるかに小さく、 p_e が支配的な荷重であることが分かる。

5. 設計荷重に関する考察

本構造物の梁部材に作用する荷重は、中詰材設置時に生じる p_e と、波作用時の p_w および Δp_s である。したがって、設計においては荷重として p_e と $(p_w + \Delta p_s)_{\max}$ を考慮する必要がある。しかしながら、水理実験で $(p_w + \Delta p_s)_{\max}$ を求めることは非常に煩雑である。加えて通常の設計においては、各々の荷重の最大値を用いていることから、波作用時の荷重として p_w および Δp_s の最大 $p_{w\max}$ および $\Delta p_{s\max}$ を用いることを考え

る。そこで、荷重として、① $(p_w + \Delta p_s)_{\max} + p_e$ 、② $p_{w\max} + p_e$ および ③ $\Delta p_{s\max} + p_e$ を用いた場合の比較を表-3に示す。表-3においては、荷重①～③の p_e に対する比をまとめている。表中□で囲んだ数値は、各波高ランクにおける最大値である。表-3より、前壁最上段梁部材に波高ランク $H_i=7.8\sim 9.3\text{cm}$ の波が作用する場合のみ $p_{w\max} + p_e$ が最大荷重となり、他の場合は $\Delta p_{s\max} + p_e$ が最大荷重となる。また、前壁と後壁を比較すると、後壁の方が荷重が大きい。本構造物の場合、施工性を考慮すると、前壁および後壁の各部材は、同一の寸法とすることが望ましい。したがって、設計においては、後壁に作用する荷重を用いて部材の寸法が決定される。すなわち、本構造物の設計においては、荷重として中詰材設置時に生じる静的な中詰材水平力 (p_e) と同時差圧 (Δp_s) を考慮すれば良いと考えられる。

6. ま と め

本実験により得られた主要な結果を以下に示す。

①本実験に用いた諸元を有するスリットセルラーに、テトラポッド 6.3t 型を中詰する場合、梁部材に作用する中詰材水平力は集中荷重とみなすべきであり、その作用点数は、中詰材 1 個の支配長さ当り大半が 1 点である。

②静水中における中詰材水平力は、水深方向にほぼ単調に増加するが、天端付近においてもある有限な値を持つ。

③波作用時の中詰材水平力と同時差圧は、梁部材への伝達過程が異なり、同時に最大荷重とはならない。

④本構造物の設計において考慮すべき荷重は、中詰材設置時に生じる静的な中詰材水平力と同時差圧である。

参 考 文 献

- 宇多高明・藪崎義之・村上由高・水野益宏 (1986): 離岸堤の異形ブロック散乱の全国実態, 第 33 回海岸工学講演会論文集, pp. 417-421.
- 建設省土木研究所海岸研究室 (1990): 海域制御構造物の開発に関する共同研究報告書 (11), 共同研究報告書, 第 46 号, pp. 129-170.
- 島田真行 (1984): 消波ブロック被覆堤ケーソンに対する作用力の伝達過程について, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 571-575.
- 高橋重雄・谷本勝利・下迫健一郎 (1989): 消波ブロック被覆堤ケーソンの波力と滑動に関する実験的考察, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 594-598.
- 田中寛好・阿部宣行・加藤正進 (1985): 消波ブロック被覆堤ケーソンに作用する水平力の評価, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp. 490-494.
- 谷本勝利・高橋重雄・吉本靖俊 (1983): 衝撃応答波形からの外力推定法について, 港湾技研資料, No. 474, 24 p.
- 廣本文泰・西島浩之・今野 茂・木村岩男 (1983): 消波ブロック被覆堤に働く波浪時のブロック荷重について, 第 30 回海岸工学講演会論文集, pp. 347-351.

表-3 設計で考慮すべき荷重の検討

部 材		荷重*	$H_i=7.8\sim 9.3\text{cm}$	$H_i=20\text{cm}$	$H_i=26.1\sim 28.6\text{cm}$
前	最上段	①	1.33	1.46	1.66
		②	1.36	1.34	1.29
		③	1.15	1.48	1.72
壁	5段目	①	1.10	1.13	1.19
		②	1.05	1.06	1.01
		③	1.10	1.16	1.22
後	最上段	①	1.52	2.72	3.54
		②	1.18	1.00	0.95
		③	1.72	3.47	4.45
壁	5段目	①	1.13	1.21	1.25
		②	1.05	1.03	1.03
		③	1.14	1.24	1.32

* 荷重①: $(p_w + \Delta p_s)_{\max} + p_e/p_e$, ②: $p_{w\max} + p_e/p_e$,

③: $\Delta p_{s\max} + p_e/p_e$