

消波ブロック被覆堤のブロックの安定性に関する

現状調査 (第2報)

——消波ブロックの法尻沈下災害——

五明美智男*・高橋重雄**・鈴木高二朗***・姜 閔 求****

1. はじめに

ケーソン前面に消波ブロックを設置した消波ブロック被覆堤は、その消波機能と耐波安定性の高さから、我が国の代表的な防波堤構造の1つとなっている。その直立部のケーソンの設計法はほぼ確立されているが、消波部の設計は傾斜堤の被覆層の設計法を流用しており、必ずしも最適設計とはなっていない。著者らは、この消波ブロック部の設計法の確立を目指して、消波ブロックの被災事例の調査を行いその結果を報告している(五明ら、1995、以下第1報と呼ぶ)。すなわち、現地における主要な被災形態として、「重量不足による散乱沈下(散乱と呼ぶ)」以外に「法尻部の沈下による全体の沈下散乱(法尻沈下と呼ぶ)」という興味深い被災形態があることを明らかにした。特に、前者については、ハドソン式が堤幹部で安全側に、堤頭部や端部・急勾配斜面・リーフ上でやや危険側になることを示すことにより、既往設計式の妥当性について言及した。一方、後者については、その原因として波による液状化の可能性があることを明らかにしたものの、その被災実態は十分に把握されているとは言い難い状況である。

そこで、法尻沈下の実態を明らかにすることを目的とし、第1報に引き続き現地調査を行った。本報告は、これらの調査結果より散乱と法尻沈下の相違を明らかにし、法尻沈下の原因と対策について検討したものである。

2. 被災事例の調査方法

(1) 対象事例

解析対象とした被災事例は、1984年から1996年の間に発生した10港22事例である。このうち、秋田港、宮崎港、串木野新港、小名浜港、相馬港、新潟東港、鹿島港の7港について、1995年12月から1997年3月にかけて現地踏査を行った。なお、ここでは、ケーソン移動を伴うような被災、消波工端部の被災は対象外とした。

(2) 調査内容

過去の被災事例については、入射波条件などの他に、対象箇所(堤頭部・堤幹部)、被覆形状(端部・標準断面部)、使用ブロック、被災情報(被災時の気象・海象、被災状況)等の項目を調査した。

また、踏査については、過去の被災箇所が現在どのような状況にあるのか、また被災箇所の周辺で被災の兆候があるのかどうか、などについて現地でのヒアリングと観察を行った。

3. 被災事例の調査結果

第1報で示した宮崎港の被災は、上部工に接していた消波ブロックが全体的に沖側へ移動し、上部工との空隙が大きくなっている点が特徴的であった。また、こうした現象が法尻部の沈下に伴って生じることが水理実験により示され、宮崎港事例を法尻沈下と考えるに至った。こうした法尻沈下の特徴を整理すると、①法先の海底地盤および法尻部構造の変形を伴う場合が多いこと、②消波工天端、特に消波工法肩部で顕著な沈下や前傾が見られること、③上部工に接していたブロックが前方へ移動し空隙が生じる場合があること、④高波浪時の急激な変形のみならず長期にわたり徐々に進行する場合があること、などが指摘できる。今回の調査では、これらを法尻沈下の有無の判断材料としている。

表-1は、今回解析した被災事例の設計条件、被災状況、踏査状況をまとめて示したものである(ただし、第1報の再解析6事例を含む)。以下、特徴的な結果を港別に列挙する。

(1) 宮崎港

延伸中の南防波堤は、漂砂の顕著な海岸に建設されるため着工以前より洗掘対策が検討されてきた経緯があり、現在も調査が進められている。1997年3月に踏査した場所(事例No.5、以下「事例」は省略する)は、第1報で示した被災箇所(No.4)からさらに700m程度堤頭部側に及ぶ範囲である。堤頭部側では、過去に沈下が生じた際にブロックを補充しているにもかかわらず、踏査時にも天端の沈下と前傾化が確認された。一方、これとは対照的に、事例No.4の被災箇所における沈下はほと

* 正会員 水修 東亜建設工業(株)技術研究所

** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 耐波研究室長

*** 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所 耐波研究室

**** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 耐波研究室

表-1 解析および踏査事例一覧

No.	港 名	対象箇所	消波工形状	設計波 (有義波)	海底勾配	使用ブロック**	被災時気象擾乱	被災波 (有義波)***	ブロック被災状況	その他被災状況	現地踏査
1	秋田港南防波堤	堤幹部消波工(E)	標準断面部	7.5 m, 13.5 s		T50t 型(1 : 1.5)	1984/8 台風 10 号	設計波以下	沈下(最大 3 m)		1996/2
2		堤幹部消波工(E)	標準断面部	7.5 m, 13.5 s		T50t 型(1 : 1.5)	1985/9 台風 13 号	設計波以下	沈下 (最大 3.5 m)		1996/2
3	石狩湾新港	隅角部近接消波工	標準断面部	5.6 m, 11.0 s		T4, 20t 型	1985/11	設計波以下	沈下(3~5 m)	法先海底地盤の洗掘	
4	宮崎港南防波堤	堤幹部消波工(8)	標準断面部	8.9 m, 14.0 s	1/200	T64t 型	1988/12~ 1990/9	設計波以下	沈下	法先海底地盤の洗掘	
5		堤幹部消波工(14)	標準断面部	10.0 m, 14.0 s	1/200	T64t 型	—	設計波以下	沈下		1997/3
6	むつ小川原港防波堤	北側隅角部消波工	標準断面部	7.1 m, 13.0 s	1/50	T50t 型	1991/2/16~17	9.6 m, 13.4 s	一部沈下 (0~1.5 m)		
7		堤幹部近接消波工	標準断面部	6.3 m, 13.0 s	1/100	T50t 型		7.5 m, 11.4 s	一部沈下		
8	八戸港中央第 2 防波堤	堤幹部消波工(高)	標準断面部	6.6 m, 13.0 s	1/100	T40t 型		5.9 m, 11.4 s	一部沈下		
9		堤幹部消波工(A)	標準断面部	6.0 m, 13.0 s		T50t 型	1991/9/27	設計波以下	折損, 散乱, 沈下		1997/3
10	串木野新港防波堤(西)	堤幹部消波工(B)	標準断面部	7.7 m, 13.8 s		T64t 型		設計波以下	折損, 散乱, 沈下		1997/3
11		堤幹部消波工	標準断面部	6.2 m, 14.0 s	1/100	T25t 型	1993/8 台風 11 号	6.6 m, 12.0 s	沈下, 崩落	法先海底地盤の洗掘	1995/12, 1996/10
12	小名浜港防波堤(第 2 西)	堤幹部消波工(10)	標準断面部	6.1 m, 14.0 s	1/100	T25t 型		6.6 m, 12.0 s	沈下, 崩落	法先海底地盤の洗掘	1995/12, 1996/10
13		堤幹部消波工(11)	標準断面部	6.8 m, 14.0 s	1/100	T25t 型		8.6 m, 12.0 s	沈下, 崩落	法先海底地盤の洗掘	1995/12, 1996/10
14	相馬港防波堤(南)	堤幹部消波工(12)	標準断面部	8.1 m, 14.0 s	1/100	T50t 型		9.1 m, 12.0 s	沈下, 崩落	法先海底地盤の洗掘	1995/12, 1996/10
15		堤幹部消波工(4)	標準断面部	4.5 m, 15.0 s		R25t 型(1 : 1.5)		4.9 m, 10.8 s	沈下, 崩落, 散乱	法先海底地盤の洗掘	1995/12
16	鹿島港防波堤(西)	堤幹部消波工(3)	標準断面部	4.5 m, 15.0 s		R25t 型(1 : 1.5)		4.9 m, 10.8 s	沈下, 崩落, 散乱	法先海底地盤の洗掘	1995/12
17		堤幹部消波工(2)	標準断面部	4.5 m, 15.0 s		R25t 型(1 : 1.5)		5.0 m, 10.8 s	沈下, 崩落, 散乱	法先海底地盤の洗掘	1995/12
18	新島港防波堤(西)	堤幹部消波工(1)	標準断面部	4.5 m, 15.0 s		R25t 型(1 : 1.5)		4.6 m, 10.8 s	沈下, 崩落, 散乱	法先海底地盤の洗掘	1995/12
19		堤幹部消波工	標準・端部	8.3 m, 12.9 s		T50t 型(1 : 1.5)	1995/11	設計波以下	沈下		1996/3
20	鹿児島港南防波堤	堤幹部消波工	標準断面部	7.1 m, 12.0 s	1/100	T32t 型	1996/9 台風 17 号	7.35 m, 11.0 s (波高計)	沈下, 散乱		1996/10
21		堤幹部消波工	標準断面部	8.0 m, 12.0 s	1/100	T40t 型			沈下, 散乱		1996/10
22	串木野新港防波堤(東)	堤幹部消波工	標準断面部	8.6 m, 14.0 s	1/100	T50t 型			沈下, 散乱		1996/10

* 前報でも解析に用いたことを示す ** 各記号はそれぞれ, T: テトラポッド, R: 六脚ブロックを示す *** 説明のない数値は被災後に行われた波浪推算結果による堤前波を示す



写真-1 串木野新港被災状況 (1991/9)



写真-2 串木野新港踏査時の状況 (1997/3)

んど見られなかった。このように、同一の防波堤で同じような沈下を経験していても、その後の沈下状況には顕著な差が見られることがあるものと思われる。

(2) 串木野新港

1988 年に完成した延長 1,085 m の防波堤 (西) において、1991 年 9 月の台風 19 号により、北側 323 m にわたりブロックの折損, 散乱, 沈下が生じた (No. 9, 10)。写真-1 は、その時の被災状況の一例を示したものであり、防波堤上部工に接していた 50 t ブロックが前方へ移動し空

隙が生じている様子がよくわかる。こうした変形は、前述の宮崎港の被災事例とよく類似しており、宮崎港と同じ法尻沈下が主要因と考えられる事例である。なお、被災箇所は、64 t のブロックを補充して復旧されている。

また、1997 年 3 月の踏査時には、上述の被災箇所の南側地区で、沈下の著しい所が 2 箇所確認された。写真-2 は、沈下箇所を沖側から見たものであり、局所的に沈下が生じている様子がわかる。このような沈下状況は、当港に限らず他の踏査地点でも多く見られており、現地で



写真-3 鹿島港被災状況 (1996/9)



写真-4 相馬港南防波堤踏査時の状況 (1995/12)

は局所的に沈下が生じることが少なくないものと思われる。

(3) 鹿島港

鹿島港では、1996年8月20日から22日にかけて、台風18号からのうねりが残っているところに本州の南海上を北上した台風17号の影響が加わり、17号最接近時の22日夕方には鹿島港観測史上最大の $H_{1/3}=7.35\text{m}$ を記録した。この台風からの猛烈な風と波により、既設の南防波堤延長3,285mのうち消波工(32~50t)が約1,200mにわたって被災を受け、消波ブロックの破損および散乱、沈下、一部本体の損傷が生じた(No.21)。写真-3は典型的な被災状況を示したものであり、上部工前面でぽっかりと空隙ができ天端が変形しているのがわかる。ただし、顕著な前傾や前面海底地盤の変形などは見られず、法尻部の沈下が被災要因となったかどうかは不明である。

(4) 相馬港南防波堤

1993年8月27~28日に太平洋岸を北上した台風11号により、延長1,580mの南防波堤のうちの4区間計480mが被災した(No.17)。写真-4は1995年12月の踏査時に撮影したものであり、補充されたブロックと既設のブロックの色の違いから、長い区間にわたり法肩から法面にかけての沈下が顕著だったことがわかる。また、被災時には前面海底地盤の洗掘が生じていることから、この事例は洗掘に伴う法尻沈下であった可能性がある。

(5) 小名浜港防波堤(西)

前述の相馬港と同じ台風11号により、防波堤(第1

西)、(第2西)において、それぞれ計406m,254mにわたり消波ブロックの沈下、崩落と前面海底地盤の洗掘が生じた(No.11,12,13,14)。洗掘が生じていることから法尻沈下の可能性もあるが、表-1に示すように被災時には設計波以上の波が作用しており、重量不足による散乱が要因となっていることも考えられる。

1995年12月および1996年10月に、上述の被災箇所およびその周辺を踏査した。復旧部分は目視で確認することができ、特に被災時の法肩の沈下が大きかったことが推測される。また、被災箇所周辺には天端が沈下している箇所が数カ所観察された。これらの場所は、消波ブロックの法肩の部分が無くなっており、上部工直前からすぐに急な法面となっている点が特徴的であった。

4. 被災事例の解析

(1) 消波ブロックの足折れによる沈下

前章で示したように、現地では主要な被災形態である散乱と法尻沈下が混在している。ここでは、被災形態の1つでありながら第1報で言及しなかった消波ブロックの足折れによる沈下について検討する。

被災箇所の一部でブロックの足の折れるようなことは頻繁にあるが、全体的にブロックの破壊(折損)が顕著となっているような事例はほとんどない。宮崎港断面での実験によれば、テトラポッドの足2本が100%折れたとしても、所定の断面に流出しない限り沈下は一定値(宮崎港の場合でも天端沈下量で約3.5m)となることが報告されている。現地での天端最大沈下量は5m以上であり、足折れ以外の要因も考えざるを得ない。しかも、現地におけるブロックの足の折損率はそれほど大きくないと考えられることから、ブロックの破壊(折損)は、被災の主要な要因とは考えにくい。また、施工直後の締め固まりは、通常ある程度は避けられないものであるが、締め固まりによる沈下は実際にはわずかであると思われる。

(2) 重量不足による散乱

消波ブロック災害の主要な2つの被災形態のうち、重量不足に起因するものについて検討する。図-1は、消波工面積に対する沈下・散乱面積の比として計算される変形量 $\Delta A/A$ と重量安定性 W_u/W_a との関係を示したものである。ここでは、実際の使用重量 W_u とハドソン公式による設計重量 W_a により定義される W_u/W_a によって重量安定性を考えることとする。これは、設計波作用時の散乱に対する安全率を示しているが、被災時の波浪が不明な場合が多く被災時の必要重量 W_f が明確でないために用いている。ただし、来襲波浪が設計波より大きいかどうかについて、 W_u と W_f の比として図に示している。この図より、以下の点が指摘される。

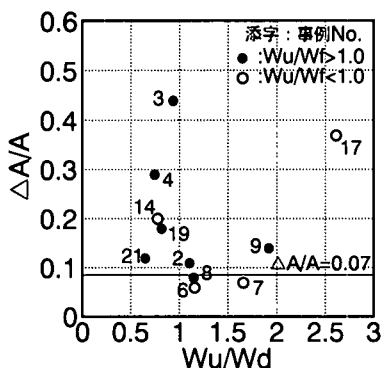


図-1 重量安定性と変形量の関係

(a) $W_u/W_d < 1.0$ の領域

① 小名浜港第2西 (No. 14), 新潟東港 (No. 19), 鹿島港 (No. 22) では 11~20% の変形量であり, これらの事例は重量不足による散乱と考えられる.

② 石狩湾新港 (No. 3), 宮崎港 (No. 4) では, 来襲波が設計波よりかなり小さい ($W_u/W_d > 1.0$) にもかかわらず, それぞれ 44%, 29% と非常に大きな変形が生じている. これらの事例は, 散乱だけではなく法尻沈下の可

能性が考えられる.

(b) $W_u/W_d > 1.0$ の領域

① 十分な重量が確保されているにもかかわらず, 相馬港南 (No. 17), 串木野新港 (No. 9) で顕著な被災を受けている. これらの事例は, いずれも法尻沈下の可能性が考えられる.

② むつ小川原港 (No. 6), 八戸港第1 (No. 7), 第2 (No. 8) は変形量が小さい事例である. 被災状況として先端部分の沈下のみが見られ, また来襲波も設計波に近いかそれ以上であり, これらは重量不足による散乱が原因と考えられる.

(3) 法尻の沈下

法尻沈下の場合, 洗掘および波による液状化の2つの原因が考えられるもののどちらかは明らかではない. ただし, その原因如何にかかわらず, ブロック法尻部の安定性が非常に重要な要因となる. 図-2 は, 各事例の法尻部構造を無次元量で示したものである. すなわち, ケーソン前面壁からの距離 x , 海底からの距離 z で座標を定義し, それぞれを設計波波長 L , H.W.L. 水深 h で無次元化し消波工を含む被覆部を表現した. 各事例の法尻部構造は実に多様でその規模もまちまちである. ただし, 法

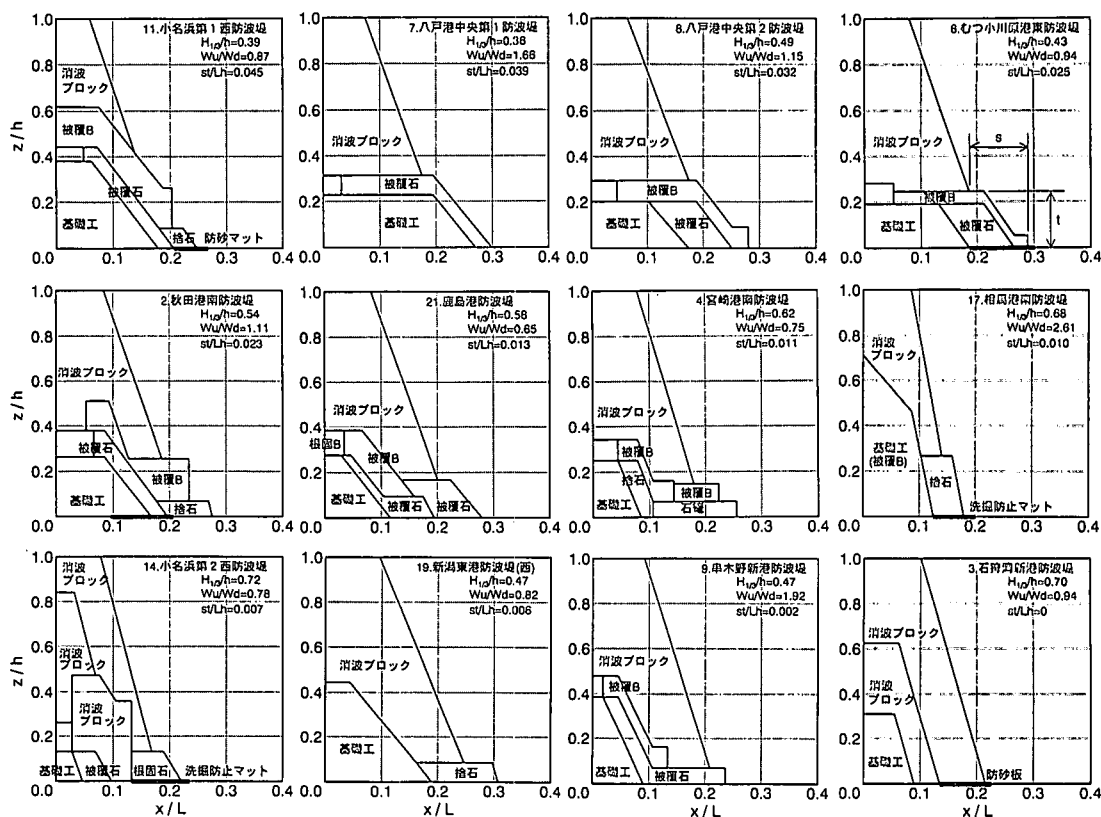


図-2 法尻部構造比較図

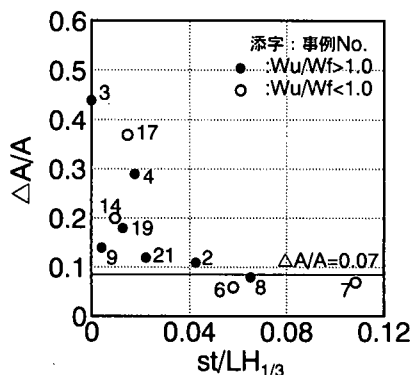


図-3 法尻部安定性と変形量の関係

尻部が波長の0.15~0.25付近にあること、被災変形量の大きな断面では法尻部が薄いなど、対策が必ずしも十分でないことがわかる。したがって、この法尻部の大きさを示す無次元量でさらに検討を進めることにした。すなわち、消波工先端に深の法尻部の幅 s 、厚さ t を波長と設計有義波高 $H_{1/3}$ で無次元化した $st/LH_{1/3}$ で法尻部の安定性を検討した。なお、マットやシート類は沈下防止効果があるがここでは断面積のみを考慮した。今回対象とした事例では $st/LH_{1/3}=0\sim0.011$ ($st/Lh=0\sim0.045$)となっている。

図-3は、図-1と同様、変形量 $\Delta A/A$ と法尻部安定性 $st/LH_{1/3}$ の関係を示したものである。変形量は法尻部の安定性に大きく依存しており、法尻部の規模が小さいほど大きな変形量を示すことがわかる。また、法尻部の規模がある程度大きくなると変形量は散乱にのみ依存し、変形量は小さく0.07程度となっている。ここで、法尻部の変形が生じなかった $st/LH_{1/3}$ の限界値は、秋田港(No. 2)の0.043に相当することから、法尻部沈下が主因となる沈下災害の目安として、 $st/LH_{1/3} < 0.04$ と考えることとした。

(4) 2つの指標と消波ブロックの被災

図-1と図-3から、重量安定性および法尻部安定性を示す2つの指標と被災形態との関係を示したものが図-4である。被災形態は、 $st/LH_{1/3}=0.04$ 、 $W_u/W_d=1.0$ の直線により、①被災無し、②法尻沈下、③散乱、④②、③の複合した領域、の4つに分類できると思われる。また、この図より以下の点が指摘される。

① $W_u/W_d \gg 1.0$ にもかかわらず生じた相馬港南(No. 17)、串木野新港(No. 9)の事例や、 $W_u/W_f > 1.0$ で大きな変形を生じた石狩湾新港(No. 3)、宮崎港(No. 4)の事例は、法尻部の安定性が不足したことが主要因と考えられる。

② 現地踏査結果や重量安定性だけでは説明できな

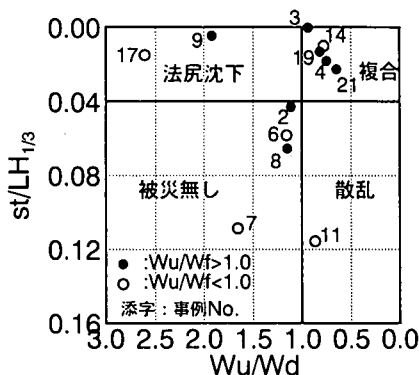


図-4 各指標による被災形態・要因の分類

かった小名浜港第2西(No. 14)、新潟東港(No. 19)、鹿島港(No. 21)の事例は、複合領域に入り、重量不足と法尻部の沈下が複合して生じたものと考えられる。

③ 秋田港(No. 2)の被災事例は4つの領域の境界付近にあり、被災要因の特定が難しい事例となっている。

5. おわりに

消波ブロック被覆堤の消波ブロックの現地被災事例、特に沈下災害について解析を行い、以下のような結論を得た。

(1) 現地では消波ブロックの沈下災害が多いことを示すとともに、被災形態の特徴を指摘した。

(2) 2つの被災形態のうち、重量不足についてはハドソン式で説明できることを再確認した。また、重要な被災形態である法尻沈下については、法尻部の安定性を示す $st/LH_{1/3}$ によってある程度説明できることを示した。

(3) 2つの指標により、現地被災事例は4つの領域に分類され、散乱と法尻沈下が混在するような場合でも各事例の被災状況が合理的に説明できることを示した。

なお、今後は法尻沈下のメカニズムを調べていく必要があり、その過程で今回提案した $st/LH_{1/3}$ という指標の妥当性も検討して行かなくてはならない。

最後に、本文をまとめるにあたり貴重な資料を提供していただき、また御助言を頂いた運輸省各港湾建設局、北海道開発局開発土木研究所の関係者の方々に謝意を表する。

参考文献

- 五明美智男・堺 和彦・高山知司・寺内 潔・高橋重雄(1995): 消波ブロック被覆堤のブロックの安定性に関する現状調査, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 901-905.
- 宮井真一郎・大平勝司・塩見雅樹(1993): 被災防波堤集覧(その4), 港湾技研資料, No. 765, 248 p.