# 傾斜堤の港内側被覆ブロックの耐津波特性に関する水理模型実験\*

### 五洋建設株式会社 髙橋 研也

### 東北大学大学院工学研究科 田中 仁

# 1. はじめに

平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震津波によって防波堤などの港湾構造物 の多くが被災したが、その原因としては、防波堤に作用した巨大な水平力に加え、防波堤の天 端を越流した津波が防波堤背後で強い流れとなり基礎マウンドや海底地盤を洗掘して防波堤の 安定性を低下させたためであるものと考えられている。これを踏まえ、国土交通省港湾局<sup>1)</sup>は 「防波堤の耐津波設計ガイドライン」において防波堤を設計するための基本的考え方をとりま とめているが、その構造形式としては主に混成堤および消波ブロック被覆堤を対象としており、 他の構造形式についてまでは言及されていないのが現状である。

一方,砕波帯内などの水深が比較的浅い位置においては,石やコンクリートブロックを台形 状に捨て込んだ構造形式である傾斜堤が用いられることもあるが,我が国においては混成堤な どと比較して適用事例が少なく,耐津波特性に係る調査研究も未だ十分に進んでいないようで ある。例えば,片山ら<sup>2)</sup>は太平洋に面する発電所取水専用港湾の傾斜堤が東北地方太平洋沖地 震津波により被災したことを報告しているが,大規模な被災事例は他に見当たらない。また, 松本ら<sup>3)</sup>,榊山<sup>4)</sup>,三井ら<sup>5)</sup>は水理模型実験により津波に対する傾斜堤の捨石およびブロックの 安定性について検討しているものの,上部工の有無やブロック形状の違い等により防波堤形状 が三者三様であり,傾斜堤の耐津波設計に向けてはさらに知見を積み重ねていく必要がある。

本研究においては、上部工を有する消波ブロック1層被覆式傾斜堤の港内側被覆ブロックの 耐津波特性に着目した水理模型実験をおこない、今後の耐津波設計に資することを目的とした。



\*Hydraulic model experiment on structural resistiveness against tsunami action of port side armor block of sloping breakwater by Kenya Takahashi and Hitoshi Tanaka

# 2. 実験方法

図-1 に消波ブロック1 層被覆式傾斜堤模型断面図を示す。実験縮尺を Froude の相似則に準じた 1/64.8 とし、46.0 t型消波ブロックを 160 g、9 t型被覆ブロックを 33 g のモルタル製模型(比重 2.3)として再現した。なお、縮尺効果によって、ブロックの安定性は実機に比べて保守的な結果になりうるものと考えられる。堤体を長さ 50 m、幅 0.6 m、高さ 1.2 m の断面還流水槽内に設置して還流ポンプにより津波を模擬した流れを作用させ、ブロックの移動および砕石の吸出しなどを目視によりよく観察しながら水位、流速をサンプリング周波数 20 Hz にて、間隙水圧を 1,000 Hz にて計測した。なお、還流ポンプのモーターの出力は 60 秒かけて立ち上げ、その後定常流を 120 秒(実機スケールで約 16 分)以上作用させた。そして、模型の被災が観察されなかった場合には還流ポンプを停止し、上部工前趾天端上の越流水深が 5 mm 深くなるまでモーターの出力を上げた実験を再度おこない、この手順を模型が被災するまで繰り返した。その間、ブロック模型単体がロッキングなどにより微動する状況であったとしても、ブロックが群体として移動するなどの顕著な被災が発生するまでは積み直しをせずに実験を継続した。

表-1 に実験条件を示す。港内側水位の変化によって港内側被覆ブロックの被災形態に違いが 現れるのかを確認するために,H.W.L. (+1.0cm),M.S.L. (±0.0cm),L.W.L. (-1.3cm)の3潮位を 設定した。なお、堤体背後に設けた越流堰の堰高を事前におこなった流量検定に基づいて調整 することによって、港内側水位を固定した実験をおこなった。三井ら<sup>5)</sup>と同様に、津波が堤体 を越流および浸透する通常の実験ケースに加えて、港外側の消波ブロックと被覆ブロックとの 間に止水シートを敷設して越流のみを発生させたケース、および上部工後趾上に止水板を設置 して浸透流のみを発生させたケースも実施した。ケース1のみ2回実施して再現性を確認した。

写真-1 に防波堤模型設置状況を示す。著者らのが別途おこなった耐波浪特性に関する水理模型実験と同様に,施工実績に合わせてL.W.L.以深を二層乱積,以浅を二層整積として設置した。

#### 3. 実験結果

(1) 被災形態

写真-2に実験状況および港内側被覆ブロックの実験後の状況を示す。港内側被覆ブロックの

ケース	潮位	止水 シート	止水 板	実験 状況
1	H.W.L.(+1.0cm)			批法
2	$M.S.L.(\pm 0.0 \text{cm})$	無	無	赵师 温添法
3	L.W.L.(-1.3cm)			仅也加
4	H.W.L.(+1.0cm)			
5	$M.S.L.(\pm 0.0 cm)$	有	無	越流
6	L.W.L.(-1.3cm)			
7	H.W.L.(+1.0cm)	無	有	浸透流
	-	-	-	-

表-1 実験条件(実験縮尺:1/64.8)



写真-1 防波堤模型設置状況



写真-2 実験状況および港内側被覆ブロックの実験後の状況(破線: 落水位置, L.W.L.)

群体移動または砕石の吸出しが観察されて被災と判断された場合の状況を示している。越流水 深は波高計 H<sub>1</sub>における上部工天端からの定常時の値である。なお,写真中の破線は越流水脈の 落水位置および L.W.L. (整積・乱積境界)をケース間の位置やスケールを合わせて示している。

まず,通常の実験であるケース 1~3 を見ると,港内側水位が H.W.L.の場合においては越流 水脈が水面に落水して整積・乱積境界の被覆ブロックがわずかに被災するのみであるが, M.S.L. および L.W.L.の場合においては越流水脈が被覆ブロックを直接叩きながら勢い良く流下して, 被覆ブロックの被災位置が下側にずれるとともにその程度も大きくなっていることが分かる。

次に,越流のみを発生させたケース 4~6 を見ると,港内側水位の変化による影響はケース 1 ~3 と同様の傾向であるが,被覆ブロックに浸透流による流体力が作用しなくなる分だけ,被 災時の越流水深がケース 1~3 と比較して深くなっていることが分かる。

最後に,浸透流のみを発生させたケース7を見ると,他のケースと比較して大きな浸透流が 堤体に作用するために,被覆ブロックの移動の前に砕石の吸出しが発生していることが分かる。

(2) 越流および浸透流の影響

図-2 に港内外水位差 H<sub>1</sub>-H<sub>3</sub>と単位幅当たり流量との関係を示す。ここに、単位幅当たり流量 とは還流管に設置された電磁流量計による計測値を水路幅 0.6 m で除したものである。図中に はロッキングまたはブロック単体移動開始時と、ブロック群体移動被災時の位置も示した。被 災時の流量は港内側水位が高い場合の方がわずかに小さくなっていることから、津波来襲時の



図-2 港内外水位差 H<sub>1</sub>-H<sub>3</sub>と単位幅当たり流量との関係 (〇:ロッキングまたはブロック単体移動開始時,×:ブロック群体移動被災時)

潮位が高い場合の方がより浅い越流水深(すなわち,より低い津波高さ)で被災が開始するものと考えられる。また,越流のみを発生させたケース4~6の被災時の流量は通常のケース1~3よりもやや小さくなっていることから,港内側被覆ブロックの安定性に対しては浸透流よりも越流の方がやや支配的であるものと考えられる。一方,浸透流のみを発生させたケース7の被災時の流量はケース1と4の間となってはいるもののほぼ同程度であり,三井ら<sup>5</sup>が指摘しているように,越流量と浸透流量の合計により安定性を評価できる可能性が示唆される。

(3) 越流量および浸透流量の簡易推定

通常の実験であるケース 1~3 における越流量および浸透流量の推定を試みた。図-3 に越流のみを発生させたケース 4~6 における単位幅当たり越流量 q1 と波高計 H1 における越流水深 h1の関係を,図-4 に浸透流のみを発生させたケース 7 における単位幅当たり浸透流量 q2 と港内外水位差 H1-H3の関係を示す。本実験条件の範囲内において,q1,q2 は式(1),(2)により表わされる。

$$q_1 = 0.3228h_1\sqrt{2gh_1} + 0.0023 \tag{1}$$

$$q_2 = 0.0496(H_1 - H_3) + 0.005 \tag{2}$$

ここに, g は重力加速度である。なお,本間 <sup>つ</sup>が提案した台形せきの完全越流における流量係 数は m = 0.35 であることから,本実験断面においても同程度の流量係数が得られたことになる。 図-5 にケース 1~3 における単位幅当たり越流量 q<sub>1</sub>,浸透流量 q<sub>2</sub>の推定値と実験流量との比 較を示す。式(1),(2)による推定合計流量 q<sub>1</sub>+q<sub>2</sub> はやや過大評価するようであるが,概ね実験流

量を再現している。また,流量が小さく津波高さが低い場合は浸透流が支配的であるが,流量 が増加しても浸透流量は微増に止まり,越流量が浸透流量を上回った所で被災が発生している。

(4) 港内側被覆ブロックに作用する表面流速および間隙水圧

図-6 にケース 1~3 における u<sub>2</sub> での法先方向最大流速と p<sub>2</sub> での最大間隙水圧を示す。落水位 置が近い場合に流速・間隙水圧とも大きくなっており,落水位置近傍で被災したと考えられる。



図-3 単位幅当たり越流量 q1 (ケース 4~6)

図-4 単位幅当たり浸透流量 q2 (ケース 7)



図-5 単位幅当たり流量(ケース1~3) 図-6 最

図-6 最大流速と最大間隙水圧 (ケース1~3)

## 4. おわりに

本研究では、上部工を有する消波ブロック1層被覆式傾斜堤の港内側被覆ブロックの耐津波 特性に着目した水理模型実験をおこない、耐津波設計に資する基礎データを取得した。その結 果、津波来襲時の潮位により被災の位置や程度が変化すること、傾斜堤の場合は浸透流を考慮 する必要があることが分かった。今後は数値解析なども通してさらに検討を進める予定である。

## 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, 37p, 2013.
- 片山裕之,石井敏雅,藤田純一,古川園健朗,緒方ゆり:数値波動水槽と3次元海浜変形 モデルを用いた港内堆砂予測,土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.75, No.2, pp.I\_523-I\_528, 2019.
- 松本和記,泉宮尊司,石橋邦彦:波および流れによる捨石堤および消波ブロック堤の安定 性に関する実験的研究,土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.70, No.2, pp.I\_259-I\_264, 2014.
- 4) 榊山 勉:津波に対する傾斜堤消波ブロックの所要質量算定式に関する一考察,電力中央 研究所報告, O15001, 28p, 2015.
- 5) 三井 順, 久保田真一, 松本 朗:マウンド天端が干出する防波堤における被覆ブロック の耐津波安定性, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.74, No.2, pp.I\_295-I\_300, 2018.
- 6) 高橋研也,佐貫 宏,菅原弘貴,高土居剛,中村友邦,熊田広幸,千葉直樹,寺嶋修平,田中 仁:消波ブロック1層被覆式傾斜堤の港内側被覆ブロックの耐波浪特性に関する実験的研究,土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.76, No.2, pp.I\_811-I\_816, 2020.
- 本間 仁:低溢流堰堤の流量係数(第二編),土木学会誌,第26巻,第9号,pp.849-862, 1940.