

## 台風 0314 号による釜山新港東防波堤の 被災メカニズムと安定性について

姜 閔求<sup>1</sup>・金 洪進<sup>2</sup>・柳 青魯<sup>3</sup>

韓国釜山新港に位置する東防波堤の堤頭部では台風 0314 号の来襲際により被覆テトラポッドが 30 %ほどが離脱し, 上部コンクリート 1 スパンが転倒した。堤幹部ではテトラポッドの離脱がほとんど発生しなかった。こうした破壊状況を究明するため水理模型実験を行った。実験では, 水位と波高を一定に固定した場合と, 台風通過時には水位と波高が変動することを着目し水位と波高を観測値に対応させた連続再現方法を用いた。実験による堤頭部の破壊率は 20 %ほどと現地破壊に比べてやや低く, 堤幹部ではほとんど 0 %と現地をほぼ再現できた。但し, 上部コンクリートの転倒は, 前者の方法によっては再現できず, 水位と波高を連続に再現した場合によって現地の破壊状況がよく再現できた。

### 1. はじめに

釜山新港は 2011 年完全開港を目指して建設中の大型港湾として, 図-1 に示しているように釜山 (Busan) の西側に位置している。沖側にある東と西防波堤によって静穏度を確保している。これらの防波堤は捨石傾斜堤と直立の上部コンクリートから構成され, 前面をテトラポッド (以下 TTP) で被覆している。

台風 0314 号 (Maemi) が通過したとき韓国の南東沿岸では高潮・高波によって甚大な被災が発生した (高山ら, 2004; 河合ら, 2004)。台風 0314 号は, 2003 年 9 月 11 日に中心気圧が 910 hPa になって, 12 日 20 時に中心気圧 950 hPa で馬山 (Masan) の西側 (Sacheon) に上陸し, 韓国の東南部を貫通し東海 (日本海) に抜けた。

写真-1 は台風来襲時に東防波堤の被災状況を示している。32 t の被覆 TTP が離脱し, 背後面に移動し, 被覆 TTP の離脱による中間被覆材や内部捨石が吸い出され, 堤頭部の上部コンクリート 1 スパンが転倒した。一方, 20 t の TTP で被覆されている堤幹部は若干の攪乱しか発生していなかった。また, 写真には写っていないが, 防波堤の背後斜面では数箇所被覆石が離脱しており, 被災が堤幹部に比べて比較的大きかった。この時, 最大高潮は 0.8 m まで達しており (Kawai ら, 2005), 来襲波の最大有義波高は 7.4 m (周期 15 秒) となり, 設計波高 5.5 m (周期 14 秒) より約 30 %程度大きかった (釜山地方海洋水産庁, 2003)。

一般的には, 防波堤の堤頭部が耐波安定性の面で弱い。ため堤頭部の被覆材の重量は Hudson 公式や van der Meer 公式によって与えられる安定重量の 1.5~2.0 倍が推奨されている。東防波堤堤頭部の場合, こうした設

計基準を反映し堤幹部 TTP 重量の 1.6 倍にしているにもかかわらず, 被災が堤頭部に集中し, 堤幹部では軽微であったのかについてはこれまで明確に説明されていない。

本研究では, こうした防波堤の被災についてその原因を明らかにするとともにその安定性について水理模型実験を通じて検討する。実験では水位と波高を一定にした方法と台風進行とともに水位や波高が変化することに着目し水位と波高を観測値に対応させ時間変化させる方法を採用した。

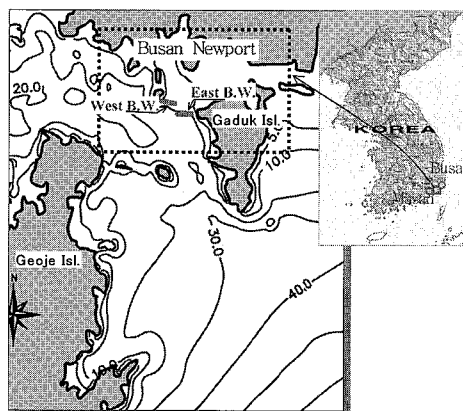


図-1 釜山新港東防波堤の位置

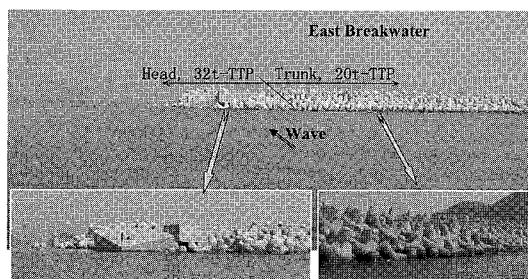


写真-1 東防波堤の被災状況

1 正会員 工博 三星物産(株) 建設部門 首席研究員  
2 工博 釜慶大学校 海洋産業研究所  
3 正会員 工博 釜慶大学教授 海洋工学科

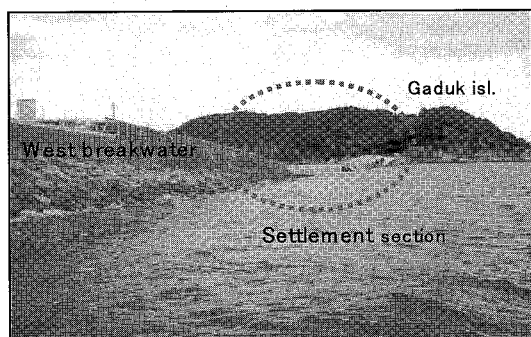


写真-2 工事中沈下した西防波堤

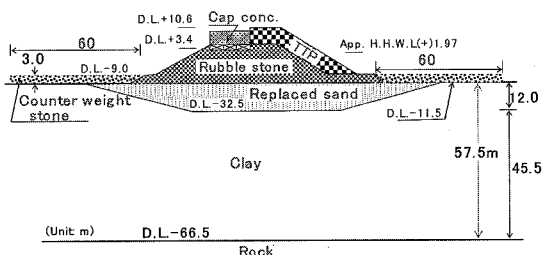


図-2 東防波堤の典型的な断面図

## 2. 東防波堤の被災および来襲波浪

### (1) 釜山新港防波堤建設経緯

釜山新港の防波堤は1997年工事を始めて、2002年上部コンクリートの一部を残したまま部分竣工している。防波堤の設置位置では軟弱地盤層が45m~55m程度と非常に深く、これをすべて浚渫・置換する地盤改良工法を用いると非常に非経済的かつ施工性も悪いと評価された。釜山新港の円滑な開港のためには第一線防波堤の工事がまず先行しないといけない状況で建設費の削減と工期短縮のため特段の対策が必要であった。そこで軟弱地盤の上部12mのみを掘削置換する部分掘削置換工法を採用し、防波堤による長期沈下は許容することにした。当時韓国ではこれまで経験もなかった工法であったため、沈下計測を並行しながら工事を慎重に進めていた。しかしながら、写真-2で示しているように、2001年工事途中西防波堤の中間部分で長さ120mにわたり3m~5mほど急速に沈下した。この沈下防止対策として、防波堤の沈下に伴ってその前後で隆起する軟弱粘土を抑えるため、防波堤の岸沖側に幅60m、厚さ3mの押え捨石を敷いている。図-2は押え捨石が敷いている防波堤の典型的な断面を表す。2006年現在も地盤沈下は続いているが、ある程度安定段階に到達しているといわれる。

### (2) 東防波堤堤頭部の被災状況

図-3は東防波堤堤頭部の破壊状況を水深測量で測った断面である。写真-1でもわかったように被覆TTPのほとんどが静水面付近で移動・流失し、上部コンクリー

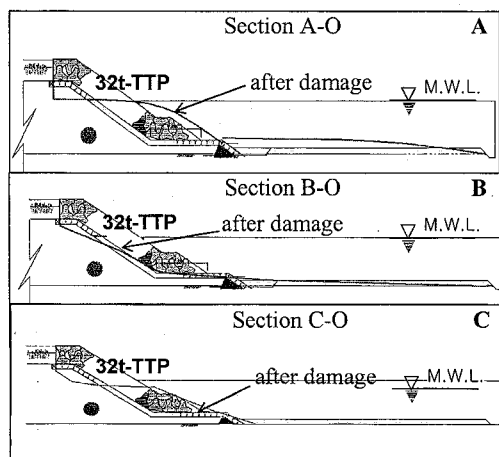
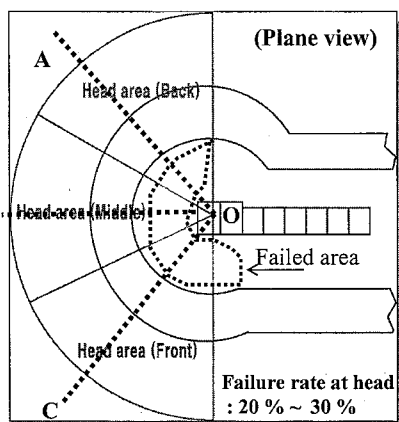


図-3 東防波堤頭部の被災状況

トの下部で根固ブロックや内部捨石も流失しており、上部コンクリートは南西方向に転倒している。特に、被覆TTPは前方部(C-O断面)で流失し、その一部が後方部(A-O断面)に移動し積もっている。一方、防波堤の法線方向の断面(B-O断面)では堤脚部まで大きく掘れている。堤頭部全体の破壊率は概ね20~30%程度である。

### (3) 台風0314号来襲時の主要な観測資料

図-4は釜山新港周辺の地形と水位や波浪観測点の位置を示す。東防波堤の位置では水深が10m~15mで、防波堤は東西方向に設置されており、その西側は航路となっている。台風0314号来襲当時波高は東防波堤の南300m地点(D.L.-15.2m)でブイ式波高計で観測された。なお、水位変動はGaduk検潮所で観測されている。こちらで観測されたデータを図-5に示す。

水位変動は、台風がSacheonに上陸(20時ごろ)する1時間前停電によりデータが取れなかった。当時釜山新港防波堤付近で高潮のピークはKawaiら(2005)によると21時ごろに0.8mほどと推算されている。当時

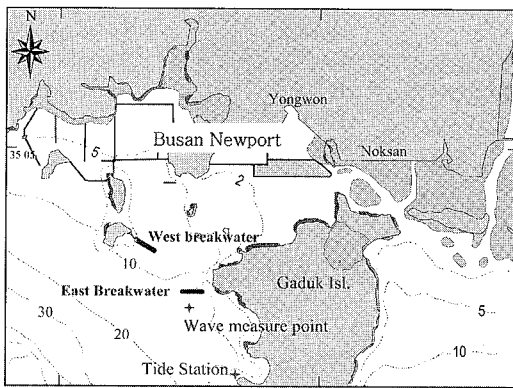


図-4 釜山新港周辺の地形および観測点

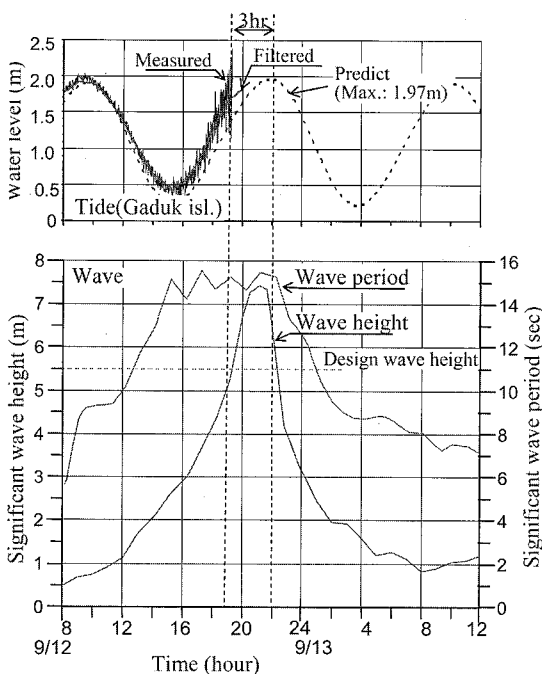


図-5 水位および波浪の観測時系列データ

は大潮期であり、また満潮（22 時）が高潮のピークと重なって、水位上昇による浸水被害が大きかった。波高は 19 時ごろ既に東防波堤の設計波高 5.5 m に近くなって、21 時ごろ当時最大有義波高 7.4 m まで上昇し、その後減少している。周期は波高のピーク時である 21 時の 6 時間前から 15 秒ほどと比較的長周期の波が来襲している。波向きは、図-1 から分かるように西側にある Geoje 島が位置しているため有義な波浪はほとんどが S 系列となる。

表-1 は 19 時から 3 時間について時間別の波高、周期および水位を表す。ここで、欠測した 21 時の高潮の値

表-1 水位と波浪の時間別観測データ

| Time    | Wave             |                  |             | Water level(m) |                 |
|---------|------------------|------------------|-------------|----------------|-----------------|
|         | $H_{1/3}$<br>(m) | $T_{1/3}$<br>(s) | Dir.<br>(°) | Tide           | Storm surge     |
| 19 : 00 | 5.10             | 15.3             | S20W        | 1.30           | +0.43           |
| 20 : 00 | 6.71             | 14.7             | S8W         | 1.65           | ND              |
| 21 : 00 | 7.42             | 15.5             | S5E         | 1.87           | 0.80(simulated) |
| 22 : 00 | 6.78             | 15.3             | S7E         | 1.97           | ND              |

は Kawai ら（2005）による高潮推定値である。

### 3. 水理模型実験

水理模型実験は、18 m(W)×15 m(L)×1 m(D)の平面水槽で 1/100 スケールの模型実験を行った。実験では特に堤頭部の破壊過程を明らかにするため、次の 2 つの方法で行っており、実験条件を表-2 に表す。

(a)一定条件実験：波浪と水位を一定に固定した実験 (Case 01～Case 04)

(b)連続再現実験：波浪と水位を観測値に対応させ時間変化させた実験 (Case 05)

連続再現実験では、最大波高の観測時 21 時を基準に 2 時間前から 3 時間にわたって水位と波高の実時間変化を反映している。水位の調節はポンプを用い、波高は造波機の振幅を変動させ 5.1 m～7.4 m の間を 7 ステップに分けて再現した。

なお、堤幹部で被覆 TTP が堤頭部に比べてほとんど破壊のなかったことについて防波堤の前面で敷いている押え捨石の効果を調べるため防波堤のない状況で波を発生し、押え捨石部を通過する波の特徴を調べた。

表-2 実験条件

| Case No. | $H_{1/3}$<br>(m) | $T_{1/3}$<br>(s) | Water level(m) |          | Wave dir.<br>(°) |
|----------|------------------|------------------|----------------|----------|------------------|
|          |                  |                  | Tide           | Surge    |                  |
| Case-01  | 7.4              | 15               | 1.97           | 0        | S                |
| Case-02  | 7.4              | 15               | 1.97           | 0        | S15°W            |
| Case-03  | 7.4              | 15               | 1.97           | 1.0      | S                |
| Case-04  | 7.4              | 15               | 1.97           | 1.0      | S15°W            |
| Case-05  | 5.1～7.4          | 15               | 1.3～1.97       | 0.43～1.0 | S                |

Sea bottom level : D. L.-12.0 m

表-3 実験結果

| Case No. | Wave             |                  |                  | Water level(m) |              | Cap con. | Failure rate (%) |       |
|----------|------------------|------------------|------------------|----------------|--------------|----------|------------------|-------|
|          | $H_{1/3}$<br>(m) | $T_{1/3}$<br>(s) | Wave dir.<br>(°) | Tide           | Surge        |          | Head             | Trunk |
| Case1    | 7.4              | 15               | S                | 1.97           | 0            | -        | 20.0             | 1.2   |
| Case2    | 7.4              | 15               | S15°W            | 1.97           | 0            | -        | 11.9             | 5.1   |
| Case3    | 7.4              | 15               | S                | 1.97           | 1.0          | -        | 18.6             | 2.4   |
| Case4    | 7.4              | 15               | S15°W            | 1.97           | 1.0          | Fail     | 21.4             | 5.9   |
| Case5    | 5.1<br>～7.4      | 15               | S                | 1.3<br>～1.97   | 0.43<br>～1.0 | Fail     | 19.9             | 1.3   |

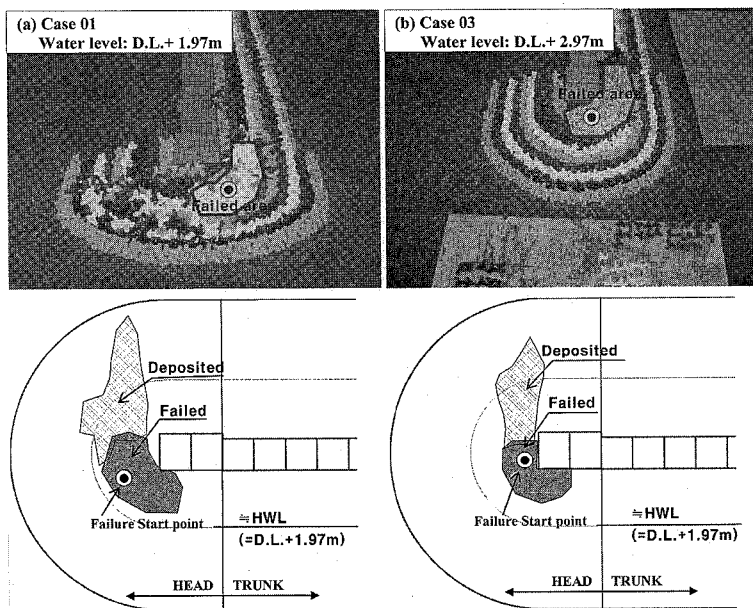


図-6 堤頭部の破壊実験結果 (Case 01, 03)

#### 4. 結果および考察

表-3 は実験結果から得られた堤頭部および堤幹部の破壊率と上部コンクリートの破壊状況をまとめたものである。Case 02 を除けばすべての Case で堤頭部の破壊率は約 20 % ほど、堤幹部は 1~6 % ほどである。ここで堤幹部の破壊率は堤頭部に隣接している領域を対象にしているため、堤頭部の影響を受けている結果である。堤頭部から離れた堤幹部では離脱した TTP はほとんど見られなかった。これらの結果より、堤頭部の破壊率は現地に比べてやや低いものの、堤幹部では現地の状況とほとんど似ている。なお、上部コンクリートの転倒は Case 04 と 05 で見られる。Case 04 は Case 03 と同様の波高と水位であるが、波向きが防波堤法泉直角方向から反時計回りに  $15^\circ$  で最も危険となる波向きである。但し、台風 0314 号の際、Case 04 に対応する波の実際波高は 6 m 以下であり、持続時間も短かったため、実験結果で見られたほどの破壊は発生しなかったと思われる。Case 05 の結果については後述する。

図-6 は水位と波高を一定の条件で行った Case 01, 03 において堤頭部の被災状況を示す。一定水位条件下における被覆ブロックの破壊は、断面的には静水面付近で、平面的には前面部と中間部で発生している。

写真-3 は、水位と波高を連続に再現した実験 Case 05 において堤頭部の破壊状況である。破壊面積は Case 03 とほぼ同程度であるが、上部コンクリートが転倒した点が異なる。

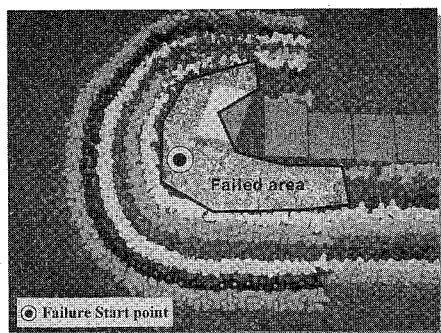


写真-3 堤頭部の破壊実験結果 (Case 05)

図-7 は写真-3 と同じ Case 05 に対して堤頭部の破壊過程を破壊段階別の断面を表す。堤頭部で破壊は 19 時 30 分ごろ水位約 D.L. + 2 m、波高約 5.7 m で断面 C-O の静水面付近ではじまり、これが徐々に背後面へ広がる。また水位上昇と波高増加に伴って破壊の領域が斜面上向に広がって、水位約 2.5 m、波高 7.1 m で上部コンクリートの下部まで被覆ブロックの離脱が広がり、またその下から内部捨石が吸い出され、その後上部コンクリートの沈下・転倒が発生した。その後、水位を 0.1 m ほど下げ、波高は 0.5 m ほど小さくし、続けて波を作させたが、破壊状況はそれほど変化しなかった。これらの結果より、堤頭部では松見ら (1996) の結果と同様に初期破壊位置が脆弱点となり、その後波高の増加に伴って破壊範囲が全体的に広がる傾向になることが分かった。

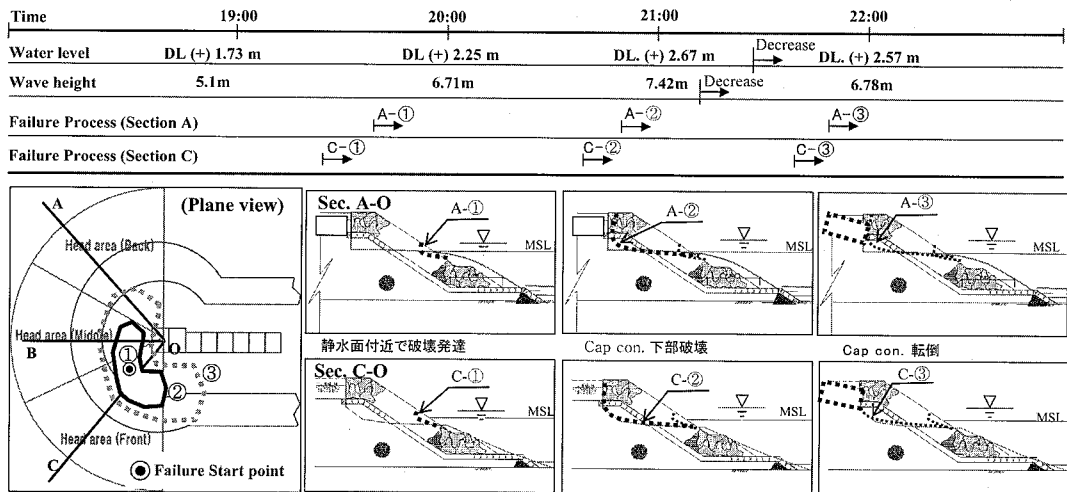


図-7 連続再現方法による堤頭部の破壊過程 (Case 05)

こうした破壊の状況は前述の図-3 で示した現地の破壊状況とよく似ていることが分かる。但し、堤頭部の中央断面（断面 B-O）では現地で発生したような破壊は発生しなかった。これについては、図-5 の水位変動から見られる数分オーダー間隔で変動する 0.5 m~1.0 m ほどの Storm surge の変動（言わば長周期成分）による水位変動と堤頭部の斜面上において碎波が重なった上発生する破壊とも十分考えられる。

今回の実験では、水位の下降時に実際の波高がまだ十分大きかったが、それ以上波を作用させなかったため、破壊領域の更なる広がりは見られなかった。しかしながら、以上の結果より、台風通過時に水位変動を伴った場合は、水位を固定したこれまでの検討結果に比べて破壊領域がさらに広がることも十分念頭に置くべきと言える。

なお、堤幹部の軽微な被害は、防波堤の沈下防止用に敷いた押え捨石による水深減衰効果によって入射波が碎波し、また、押え捨石部で水位上昇が生じ、押え捨石のない場合に比べて越波し易くなって、堤幹部に作用する波力が相対的に減衰するためであることが分かった。今後さらに大きい波高の波来襲の際にも堤幹部はある程度安定性が確保できる。ところが、堤頭部の外側にも堤幹部と同じく幅 60 m ほど押え捨石が敷いているが、堤幹部ほどの水深減衰効果がありなかったのかについては今後さらに検討を進める予定である。

## 5. 結 論

台風 0314 号の通過時、韓国釜山新港に位置する東防波堤が高潮・高波によって堤頭部の被覆 TTP が 30 % ほど離脱し、上部コンクリート 1 スパンが転倒した。堤幹部においては被覆 TTP の離脱はほとんど発生しなかった。本研究ではこうした破壊状況を究明するため水理

模型実験を行った。実験では、水位と波高を一定に固定した場合と、台風通過時には水位と波高が変動することに着目し水位と波高を観測値に対応させた連続再現方法によって堤頭部や堤幹部の破壊状況を調べた。

実験による破壊率は、2つの方法ともに堤頭部で約 20 % ほどと現地に比べてやや低く、堤幹部ではほとんど 0 % で現地とほぼ同様の破壊率が再現できた。但し、水位や波高を一定に固定した場合は来襲した波浪条件で上部コンクリートの転倒を再現できなかった。一方水位と波高を連続に再現した場合では上部コンクリートの転倒まで現地の破壊状況がよく再現できた。すなわち、台風の通過時は水位や波高が時々刻々変動するため、防波堤などの構造物の安定性を評価する際、潮位や高潮による水位と波高変動を連動した検討が必要であることを示す。また、これらによる破壊過程は信頼性設計の際にも参考になるとと思われる。

## 参 考 文 献

- 河合宏泰・富田孝史・平石哲也・金 度三・姜 閔求 (2004) : 台風 0314 号による大韓民國馬山灣の高潮追算と現地調査, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp. 1361-1365.
- 高山知司・雨森洋司・金 泰民・間瀬 肇・姜 閔求・河合宏 (2004) : 台風 0314 号による釜山沿岸の高潮・高波災害, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp. 1371-1375.
- 釜山地方海洋水産庁 (2003) : 釜山新港海洋水理現象に関する研究開発プロジェクト第 4 次報告書, pp. 292-301. (in Korean)
- 松見吉晴・大野賢一・家村健吾・木村 晃 (1996) : 多方向不規則波浪場における堤頭部の被災特性, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 811-815.
- Kawai, H., Kim, D.S., Kang, Y.K., Tomita, T. and Hiraishi, T. (2005) : Hindcasting of Storm Surges in Korea by Typhoon 0314 (Maemi), Proc. of 15th Int'l. Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE, Vol.3, pp. 446-453.