

# 空港制限表面直下における新形式 防波堤の開発

## DEVELOPMENT OF NEW STYLE BREAKWATER UNDER OBSTACLE LIMITATION SURFACE IN THE AIRPORT

浦辺信一<sup>1</sup>・吉平健治<sup>2</sup>・白石秀幸<sup>3</sup>・梅木康之<sup>4</sup>・油谷進介<sup>5</sup>・手皮章夫<sup>6</sup>  
Shinichi URABE, Kenji YOSHIHARA, Hideyuki SHIRAISHI, Yasuhiro UMEKI,  
Shinsuke ABURATANI, and Akio TEBI

- <sup>1</sup>正会員 内閣府沖縄総合事務局那覇港湾・空港整備事務所 所長 (〒900-0001 那覇市港町2-6-11)  
<sup>2</sup>内閣府沖縄総合事務局那覇港湾・空港整備事務所 建設専門官 (〒900-0001 那覇市港町2-6-11)  
<sup>3</sup>正会員 前(財)沿岸開発技術研究センター調査部 研究員 (〒102-0092 千代田区隼町3-16)  
<sup>4</sup>正会員 (財)沿岸開発技術研究センター企画部 研究員 (〒102-0092 千代田区隼町3-16)  
<sup>5</sup>正会員 中央復建コンサルタンツ株式会社 取締役 (〒533-0033 大阪市東淀川区東中島4-11-10)  
<sup>6</sup>正会員 中央復建コンサルタンツ株式会社 港湾・空港系グループ プロジェクトマネージャー  
(〒533-0033 大阪市東淀川区東中島4-11-10)

The Naha breakwater, for which a sloping top caisson covered with wave dissipating blocks was adopted, had been already constructed except 40-m at the head of south side breakwater of 900-m in total length. Since this breakwater head is located close to Naha airport, installation of blocks is very difficult because of the obstacle limitation of the airport. In addition, the wave runoff height must be considered not to exceed this surface.

The sloping slit caisson was selected as a alternative structure in order to reduce wave runoff without wave dissipating blocks. This paper describes the hydraulic characteristics of this structure investigated by the model experiments and numerical simulations.

**Key Words :** breakwater, sloping slit caisson, wave runoff, obstacle limitation surface, airport, model experiment, steel reinforced concrete

### 1. 開発の目的と特徴

那覇港那覇防波堤は、急速な経済発展を遂げつつあるアジア・太平洋地域において、国際コンテナ輸送の中継拠点としてアジアの十字路を目指す那覇港における船舶航行や港湾荷役の安全性を保证することを目的に整備が進められている。この防波堤は小型船舶への反射波の影響を抑えるため、延長900mのすべての区間で消波機能を有する必要がある。そのため、既に建設が終了した860m区間は消波ブロック被覆混成堤形式および消波ブロック被覆上部斜面堤形式が採用され、現在では図-1に示す南側堤頭部40m区間を残すのみとなっている。

本防波堤の南側堤頭部は、高波浪海域への整備であるとともに、図-2、3に示すとおり、隣接する那覇空港の制限進入表面直下に位置しているという特異な条件を有している。そのため、隣接工区で採用されている消波ブロック被覆上部斜面堤形式では、この制限進入表面下における作業空間内において消波ブロックの安全な据付が困難であるとともに、波作用時における波の打ち上げが那覇空港を利用する航空機に与える影響が懸念された。

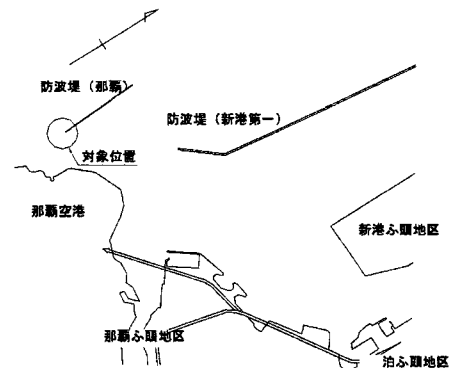


図-1 那覇港那覇防波堤位置図

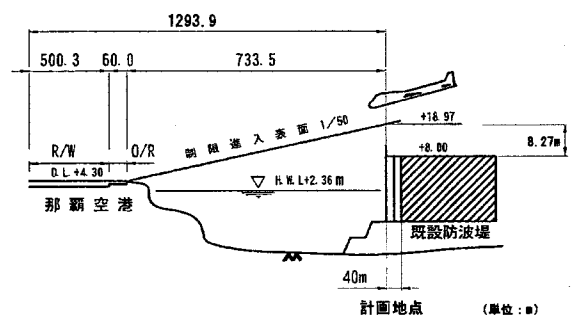


図-2 那覇空港制限進入表面

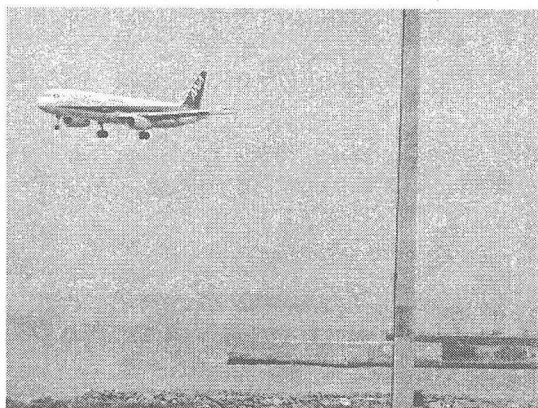


図-3 計画地点における航空機進入状況

そこで、上記問題点に対応可能な新形式防波堤として、図-4に示す斜面横スリット式上部斜面堤を提案し、波の打ち上げ現象を水理模型実験により再現するとともに、主要部材の構造解析を実施し、水理学的および構造的な性能の確認を行った結果について報告する。

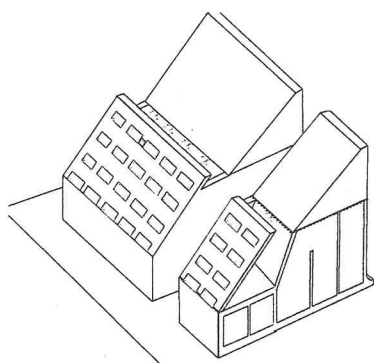


図-4 斜面横スリット式上部斜面堤一般図

この新形式防波堤である斜面横スリット式上部斜面堤は、次のような特徴を有する。

### (1) 滑動抵抗力の増大

斜面スリットケーソンと同様、上部工およびスリット斜面が傾斜しており、作用波力の水平成分の減少および鉛直成分の増加より、滑動に対する抵抗力が増大する。

### (2) 消波ブロックを使用しない

直立スリットケーソンと同様、スリット開口部において消波する構造であるため、施工上の問題を有する消波ブロックを使用しない。

### (3) 打ち上げ高さの低減

波が斜面に作用することにより、打ち上げ方向が斜め後方へ卓越するため、通常の直立スリット堤に比べ、打ち上げ高さが低減される。

## 2. 斜面横スリット式上部斜面堤の水理特性

### (1) 基本断面

斜面横スリット式上部斜面堤基本断面を図-5に示す。堤体の安定計算に用いる波力は、関口ら<sup>1)</sup>により斜面スリット堤で提案された、直立スリット堤と上部斜面堤の波力算定式を組み合わせた式により算定を行う。

斜面スリット堤の設計で考慮する波圧は、押し波時で3種類、引き波時で3種類の合計6種類の位相について考え、ケーソンの安定上最も厳しくなるように設定する。押し波時における波圧分布を表-1に示す。

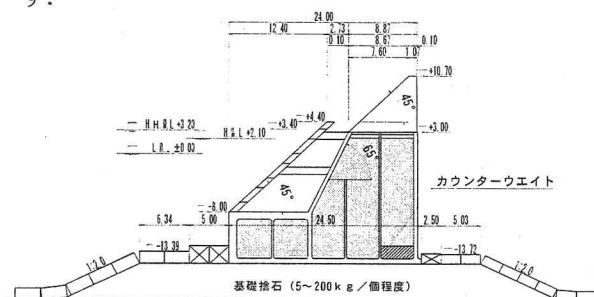


図-5 斜面横スリット式上部斜面堤の基本断面  
(スリット角度45度)

表-1 斜面スリットケーソン堤の波圧分布 (押し波時)

|                                           |  |  |
|-------------------------------------------|--|--|
| 押し波時Ⅰ：<br>スリット部の波力が最大となる位相                |  |  |
| 押し波時Ⅱa：<br>遊水室後壁に衝撃的な波力のピークが現れる位相         |  |  |
| 押し波時Ⅱb：<br>遊水室後壁に比較的ゆるやかに変化する波力のピークが現れる位相 |  |  |

## (2) 水理模型実験

### (a) 実験断面

水理模型実験は、長さ105m、幅3mの2次元造波水路を用いて行った。実験時の模型および計測器の配置状況を図-6に示す。縮尺は1/50で、仮設床は2種類の斜面部（1/15勾配4.0m、1/100勾配37.5m）と一様水深部（6.0m以上）から構成される。斜面端部から0.3m離れた位置がのり先となるように砕石マウンド（0.14m厚）を作製し、その上に模型堤体を設置した。

斜面横スリット式上部斜面堤の模型断面は図-7に示すとおりである。なお、図-7に示す平面配置のとおり、隣接する既設函および既設函前面に設置されている消波ブロック（ドロス40tf型）を再現し、その影響を考慮するものとした。

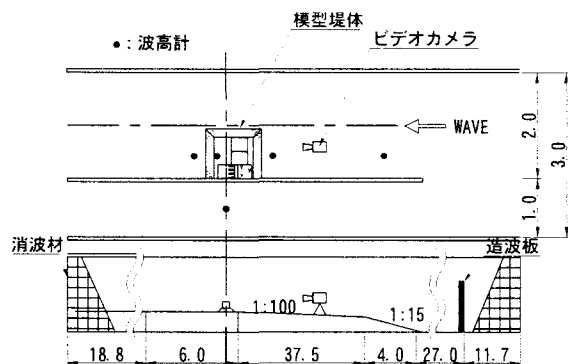


図-6 実験断面

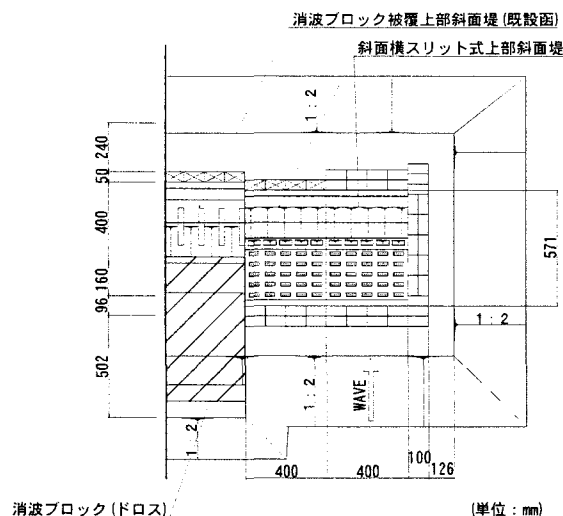


図-7 模型断面及び平面配置

### (b) 実験ケース

実験は全ケースとも打ち上げ高さの測定を目的とし、一部ケースにおいて伝達波の評価も行った。また、打ち上げ高さの低減効果を評価するため、比較代替案として大水深高波浪海域への適用性が高いとされる二重円筒ケーソン堤および消波ブロック被覆上部斜面堤を抽出し、打ち上げ高さの比較を行った。

打ち上げ高さ測定時の波浪ケースは、表-2に示す3ケースであり、那覇港において最近5年間に観測された年最大実測波（ただし、台風により那覇空港が閉鎖された期間に観測された波を除く）に基づいて設定した。また、スリット角度ケースとして、前面スリット角度の効果を評価することを目的に、スリット角度65度の基本ケース以外にスリット角度を45度とした場合も対象とした。ただし、スリット角度が45度の模型は、スリット角度65度の模型の斜角のみを変化させた形状であり、消波対象波に対応する遊水室幅等は確保されていないことに留意が必要である。以上の波浪ケースとスリット角度ケースを適宜、組み合わせたケースについて打ち上げ高さ測定を行った。なお、作用させた波はすべて規則波であり、波向は模型堤体を波向に応じて斜めに配置することにより再現した。

表-2 波浪ケース

| ケース | H (cm) | T (s) | 波向    | 観測年度  |
|-----|--------|-------|-------|-------|
| 1   | 14.0   | 1.4   | 45°   | 1997年 |
| 2   | 17.0   | 1.5   | 0°    | 1998年 |
| 3   | 14.0   | 1.2   | 67.5° | 2000年 |

### (c) 測定方法

打ち上げ高さは、波作用時の様子を模型正面に設置したビデオカメラにて収録し、スリットあるいは上部工から打ち上がる水面の最高到達点をモニター上において測定した。なお、打ち上げ高さは防波堤模型の上部工天端高さ（DL+61.4cm）を原点とし、上向きを正とする。ちなみに制限進入表面に該当する地点までの距離は約16.5cmである。

### (3) 伝達波特性

伝達率について、波向別およびスリット角度別に整理した結果を図-8に示す。選定した波浪ケースはケース2であり、他の波向きについても同ケースの波浪条件を適用した。なお、ケース2は約3年確率波に相当する。波向き0度以外のケースでは、波が防波堤を大きく越流することはなく、伝達率は各波向とも共に0.6~0.8程度であった。なお、スリット角度の差による伝達率の変化は見られなかった。

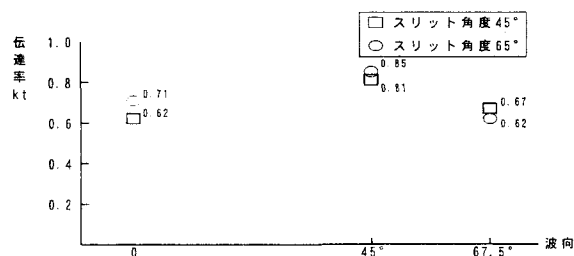


図-8 波向別スリット角度別伝達率

#### (4) 打ち上げ特性

##### (a) 打ち上げ高さの定義

実験においては、目視により計測可能な対象物として、静水面から連続する水面の上昇量（以下、水面値と称す）および静水面から離脱する水塊の打ち上げ高さ（以下、水塊値と称す）に着目し、それぞれについて最高到達点高さの計測を行うこととした。なお、実防波堤物において発生する霧状の水粒子である「しぶき」については、水理模型実験において再現することが、相似則との関係より困難であること、また、実際の航空機に大きな影響を与える可能性が低いと判断されることにより、対象としなかった。図-9に打ち上げ高さの計測における水面値と水塊値の一例を示す。

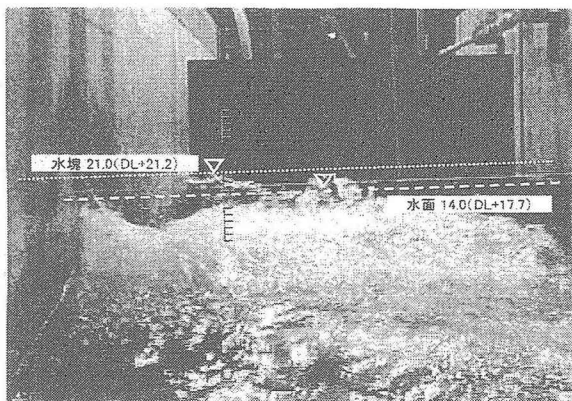


図-9 打ち上げ高さ

##### (b) 波向別スリット角度別の打ち上げ高さ

波向別およびスリット角度別の打ち上げ高さを図-10に示す。最も打ち上げ高さが高くなるケース2の場合、他ケースに比べ波浪条件が厳しいという条件を有するものの、全般的に波向が小さくなるにつれて打ち上げ高さは大きくなる傾向が見られた。スリット角度が45度の場合、打ち上げ高さはすべてのケースにおいて許容値（16.5cm）以下であり、スリット角度を小さくすることによる打ち上げ高さの低減効果が確認された。ここで、ケース3の打ち上げ高さが負値になっているのは、打ち上げ高さが上部工天端高さ以下となったことを示している。

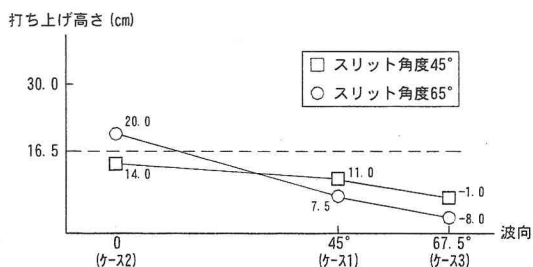


図-10 波向別スリット角度別打ち上げ高さ

ケース2の波浪条件を適用し、スリット角度45度およびスリット角度65度の場合についてはスリット部および上部工部それぞれにおいて発生する打ち上げ高さを図-11に示す。スリット角度が65度の場合、打ち上げは最初、波の峰がスリット部に作用する位相において発生した。その後、スリット後壁から上部工にかけて波の峰が作用する位相において発生した。つまり、2段階で打ち上げが発生したことになる。その際、最初に発生するスリット部の打ち上げ高さが大きく、水塊値で24cmに達した。また、水塊値は水面値の約1.2～1.4倍の打ち上げ高さであった。

スリット角度による相違は、打ち上げ高さの差違として確認することができた。また、打ち上げメカニズムについても、若干様子が異なり、スリット角度が65度の場合、スリット面に衝撃的な波力が作用する結果、激しく波が砕け、水塊が他方向へ飛散する様子を確認することができた。一方、スリット角度が45度の場合、波が防波堤を乗り越える形態であり、打ち上げは上部工を駆け上がった波が後方へ飛散する際に記録される。以上により、打ち上げ高さの計測は、精度に問題があると思われるが、打ち上げメカニズムの比較からもスリット角度45度の優位性が確認された。

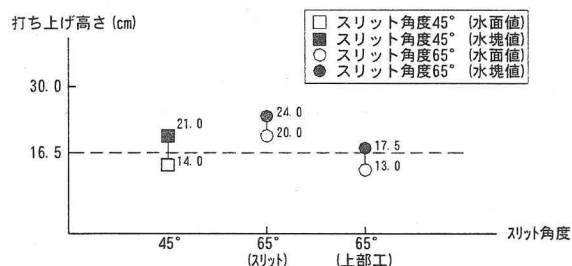


図-11 スリット角度別水面値水塊値別打ち上げ高さ

##### (c) 防波堤形式別の打ち上げ高さ

斜面横スリット式上部斜面堤における打ち上げ高さの低減効果について、二重円筒ケーソン堤および消波ブロック被覆上部斜面堤における打ち上げ高さとの比較より評価を行った。その結果を図-12に示す。ケース2での比較により、打ち上げ高さを最も小さくすることができる防波堤形式は、既設函として採用されている消波ブロック被覆上部斜面堤であり、この場合の打ち上げ高さは6cmであった。一方、二重円筒ケーソン堤は、ケース2では斜面横スリット式上部斜面堤の打ち上げ高さと同程度であった。しかし、ケース1で波向が45度の場合では、打ち上げ高さに顕著な差が生じた。これは、二重円筒ケーソン堤の場合、既設函前面に設置されている消波ブロックの不完全被覆部が生じ、その不完全被覆部において衝撃砕波が発生するため、打ち上げ高さが大

きくなったものと思われる。しかし、斜面横スリット式上部斜面堤の場合、遊水部が消波ブロックの巻き止めを兼ねた平面配置になっているため衝撃碎波は発生せず、その結果、打ち上げ高さが小さくなったものと考えられる。

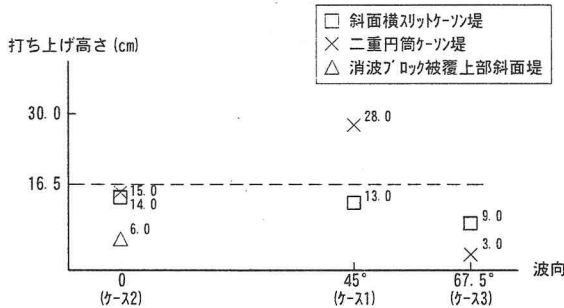


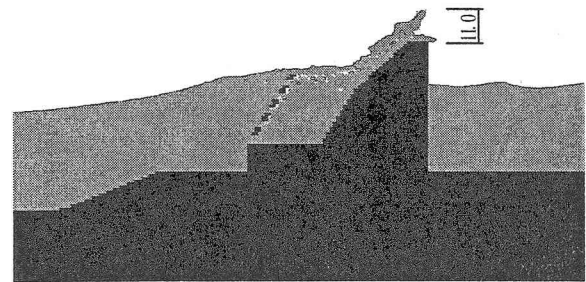
図-12 防波堤形式別打ち上げ高さ

(d) 数値波動水路による打ち上げ高さの解析

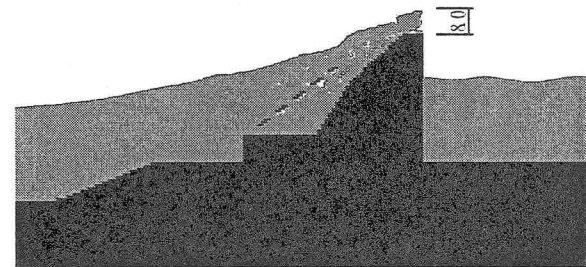
数値波動水路 (CADMAS-SURF) により打ち上げ高さの解析を行った。その際、水理模型実験と同様の断面およびケース2を計算の対象とした。なお、格子間隔は堤体付近を密に設定した (0.01~0.1cm)。

水理模型実験において打ち上げ高さの計測を行った計算開始後60~70s付近におけるスリット角度65度及び45度の場合の水面值および水塊値は、図-13に示すとおりである。いずれの計算結果についても打ち上げ高さは、実験値に比べ小さくなる結果が得られた。また、打ち上げはスリット後壁から上部工にかけて波の峰が作用する位相で発生しており、実験において確認されたスリット部からの打ち上げは再現できていない。計算値が実験値を下回る原因のひとつとして、堤体斜面部のモデル化を1cmの粗い格子で行った結果、斜面部の粗度が増大し、打ち上げ高さの低下につながったものと考えられる。

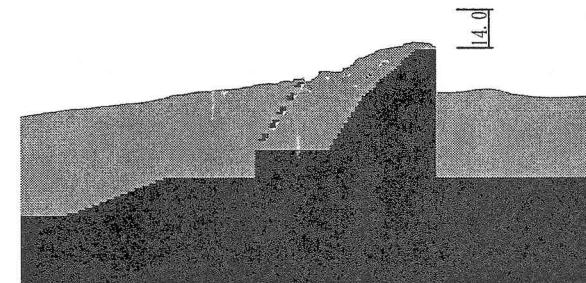
以上より計算値と実験値の整合性は十分とは言えないものの、スリット角度を45度とすることの水理学的観点からの優位性を確認することができた。



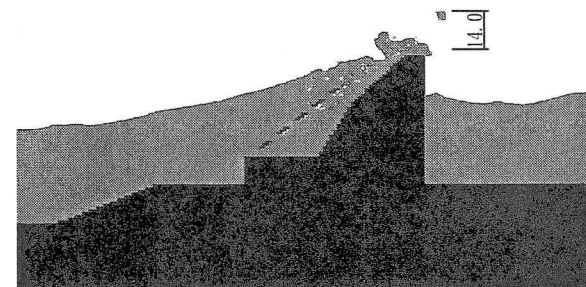
(a) スリット角度65度の水面值



(b) スリット角度45度の水面值



(c) スリット角度65度の水塊値



(d) スリット角度45度の水塊値

(単位: cm)

図-13 打ち上げ高さ計算結果

### 3. 斜面横スリット式上部斜面堤の構造

#### (1) 構造概要

斜面横スリット式上部斜面堤は、スリット部に立体ラーメン構造を採用しているとともに、スリットおよび遊水室後壁が斜角を有する構造のため、側壁が異型になる。つまり、従来のケーソンに比べて特殊な構造形状を有していることになる。このため、構造設計においては、スリット部を図-14に示す三次元の立体フレームで、また、特殊形状の側壁・隔壁部材を図-15に示すシェル要素でモデル化し、二次元線形FEM解析を実施した。

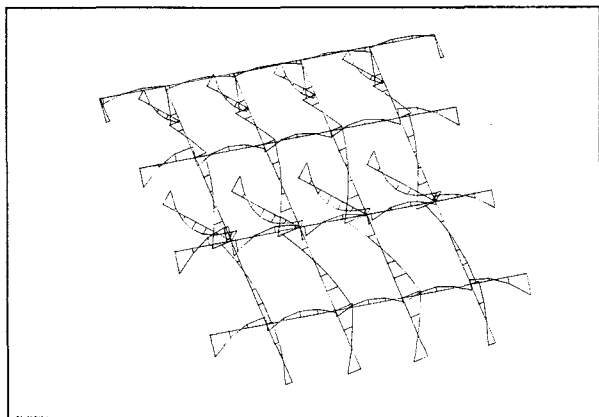


図-14 三次元立体フレーム解析結果 (曲げモーメント)

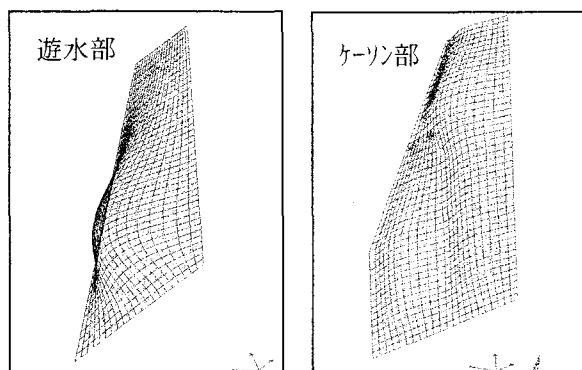


図-15 異型側壁解析結果 (変形図)

#### (2) 解析結果

スリット部材に三次元の立体フレーム解析を採用したことにより、各スリット部材を両端固定梁にモデル化する従来の設計手法に比べて、最大モーメントで約2割ほど小さくなることが確認された。同様に、遊水部およびケーソン部の異型側壁についても、従来の矩形版を対象とする計算数表を便宜的に用いた計算結果と比べて、最大モーメントで約半分になることが確認された。これらの解析結果に基づき、図-16に示すスリット部材およびその周辺の仮想梁部材には、鉄筋コンクリートに比べて耐荷性能に優れた鉄骨鉄筋コンクリートを採用することとした。

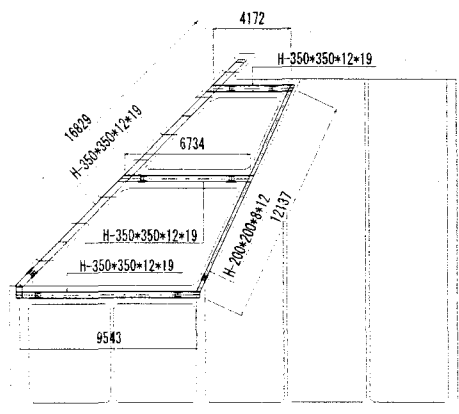


図-16 鉄骨鉄筋コンクリート採用位置

### 4. 結論

空港制限表面直下という特異な条件において適用可能な新形式防波堤として斜面横スリット式上部斜面堤を抽出し、打ち上げ高さについて水理模型実験による検証を行った。その結果、本防波堤形式は打ち上げ高さの低減効果に優れ、設定した波浪条件において、打ち上げ高さ（水面値）を空港制限表面以下に抑えることが可能であることを確認した。また、水理模型実験による打ち上げ高さについてCADMAS-SURFによる検証を行った。一部ケースのみの検証のため十分な評価を行うことは困難であるが、計算値と実験値の打ち上げ傾向は、ほぼ同じであることが確認された。

今後、より詳細な水理特性の解明や現地計測による部材応力と設計応力の比較等を実施し、より合理的で安全な防波堤形式を実現するための検討を継続したいと考えている。

謝辞：本論文の執筆にあたっては、内閣府沖縄総合事務局那覇港湾・空港整備事務所発注の調査結果の一部を活用させて頂いた。なお、本防波堤形式の開発にあたり、独立行政法人港湾空港技術研究所耐波研究室 下迫室長、ならびに構造強度研究室 横田室長には、計画段階からご指導を頂いた。ここに記して感謝を申し上げる。

#### 参考文献

関口信一郎，渥美洋一，中内勲，宮部秀一，福士昌哉，三輪俊彦：斜面スリットケーソンの開発，海洋開発論文集，第16巻，2000年6月