

離島港湾における上部斜面堤の適用性について

細山田得三*・高橋重雄**・谷本勝利***

1. はじめに

従来、離島港湾における沖防波堤の建設は、その海域の波浪条件の厳しさや膨大な建設費のためにほぼ不可能と言われてきた。しかしながら、近年、防波堤の形状に種々の改良を加えることにより、厳しい波浪条件のもとでも建設可能な新形式の防波堤が数多く開発されている。こうした耐波特性に優れた構造の採用に加えて、設計波を越えるような高波浪来襲時にはある程度越波を許容してもよいという柔軟な考え方によって、離島港湾における防波堤の建設がより具体的なものとなっている。

上部斜面ケーソン堤は、**図-1**に示すように上部工を斜面形、下部を直立壁とした防波堤であり、高波浪来襲時に波高伝達率が通常の混成堤に比べてやや高くなるものの耐波安定性に優れている。特に設計波を越える波が来襲した場合でも、ケーソンの滑動量が急激に増大することのないねばり強い構造である。このため離島港湾の条件を満たす最適形状の一つであると考えられる。

基本的な形状の上部斜面堤は、既に古くから世界各地で建設されている。我が国においても上部斜面堤は各地で採用されており(中田ら, 1983), その耐波設計法については既に森平ら(1979)によって以下のように提案されている。

- ①斜面に作用する水平力 F_{SH} は、斜面に相当する直立壁に作用する合田公式による波力に $\sin^2\theta$ を乗じて求める。ここで θ は斜面と水平線とがなす角度である。
- ②斜面に作用する鉛直下向き波力 F_{SV} は、①で求めた水

平力に $\tan\theta$ を除して求める。

- ③下部の直立壁に作用する波力 F_V は、通常の混成堤に作用する合田公式による波力とする。
- ④揚圧力は直立混成堤に作用する波力とする。
- ⑤上部斜面堤の天端高は設計有義波高と同じとする。

現在の上部斜面堤は森平の方法を用いて設計されており、安定な設計が可能となっている。しかしながら上記の設計法では必ずしも上部斜面堤のねばり強さを適切に表すことができない。また、斜面の効果をさらに高める構造の改良についても十分な検討が加えられていない。

本研究は、水理模型実験によって上部斜面堤の耐波安定性について調べ、離島港湾における沖防波堤としての適用性について検討したものである。さらに上部斜面堤の新しい構造を提案するとともに上部斜面堤の新しい耐波設計法を提案した。

2. 実験方法

模型実験は、すべて大型の2次元長水路における断面実験である。模型堤体には波圧計、三分力計を設置し、堤体に作用する波圧・波力を測定した。

図-2に、堤体形状の断面図を示す。type 1は斜面の下端高 d_c が静水面の高さと一致しており ($d_c=0.0$) これを基本断面とする。このほか基本断面に対する上部工の改良効果を調べるため5種類の堤体について実験を行った。type 2は斜面下端高が静水面よりも高く、斜面の影響がもっとも小さい。従来の上部斜面堤はこのタイプに属する。type 3~6は上部斜面の下端が静水面下に没しており半没水型の上部斜面堤である。半没水型の上部斜面堤は波力が最も厳しい静水面の部分が斜面となっており、従来の上部斜面堤(type 2)に比して波力が低減される構造と考えられる。type 2及び3は基本型と同じ天端高さで4~6は基本型の半分の天端高さである。また、type 5は斜面下端高さがもっとも深い。斜面角度はtype 6の56°を除いてすべて45°である。実験に用いたマウンドの高さは24cmで水深は104cmである。

本研究ではまず、基本型(type 1)について実験を行い、その水理特性および波力特性について詳細に調べ、次いで2~5の堤体形状に対して実験を行い、各特性の変化

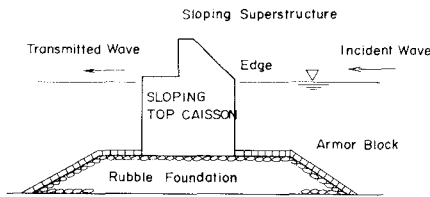


図-1 上部斜面堤

* 正会員 工博 長岡技術科学大学 助手 建設系
 ** 学生会員 工博 運輸省港湾技研 水工部 耐波研究室長
 *** 正会員 工博 埼玉大学教授 工学部 建設工学科

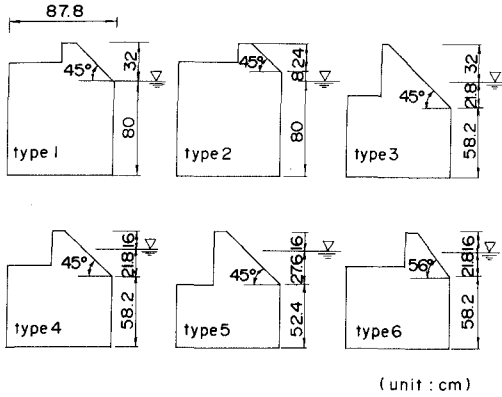


図-2 模型形状

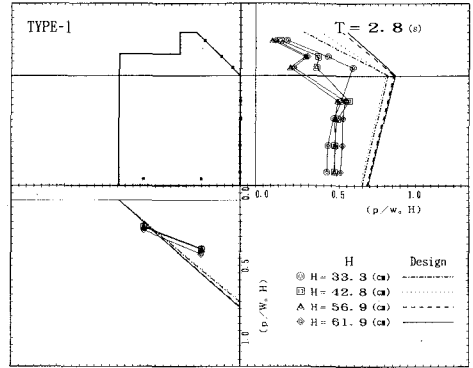


図-4 同時波圧分布 (基本型)

について調べた。さらに波力実験の結果をもとに上部斜面堤の新設計法を提案し、その妥当性を確認するために滑動実験を実施した。

3. 基本断面の波力特性

(1) 波の作用状況

図-3は基本型 (type 1) の各部に作用する波圧・波力の時系列の一例である。周期は3.6s、波高は61.9cmである。図中の縦の実線は、この時系列の中で滑動合成波力 F_s がピークとなる位相である。底面に作用する波圧 (揚圧力)、直立壁に作用する波圧 (F_v)、全水平力 ($F_{SH} + F_v$) は F_s とほぼ同じ位相でピークとなる。これに対して上部斜面部に作用する水平力は、 F_s がピークとなる位相に比べてかなり遅れてピークとなっている。このため F_{SH} の F_s に対する寄与は小さく、上部工に作用する波力と滑動合成波力が同じ位相となる直立堤に比して F_s が低減されているものと思われる。堤体全体に作用する全鉛直波力 ($F_{sv} + F_v$ 、鉛直下向きを正) の時系列によれば、波が堤体に作用し始めた時点では揚圧力が卓越し、負値をとるものの波が斜面に到達した時点で F_{sv} によって増加に転じている。このため、設計波以上の波が作用して

も滑動合成波力が滑動抵抗力を上回る時間が通常の混成堤に比して短く、滑動が急激に増大しない構造であることがわかる。

図-4には F_s がピークをとる位相の同時波圧分布を示す。周期は2.8sである。また、図中の実線および点線は直立堤に作用する合田公式による波圧分布を示す。上部斜面堤に作用する波力は混成堤に比してかなり低減されていることがわかる。特に上部斜面下端のエッジ部で同時波圧分布は屈曲している。波の入射時に水面が直立壁に沿って上昇し、エッジ部で流れが剥離して渦が発生することによるものと考えられる。なお、直立部の下端付近は、設計波圧と比較的近くになっている。

(2) 波力特性

図-5は斜面に作用する無次元水平力 F_{SH}' 、直立部に作用する無次元波力 F_v' 、無次元滑動合成波力 F_s' について実験値と現行設計法による計算値とを比較している。周期は3.5sである。各波力の値は、滑動合成波力 F_s が最大となる位相での計測値で、横軸はすべて波高水深比 H/h である。 F_{SH} 、 F_v 、 F_s は、 w 、 H とそれぞれ斜面の高さ ($h_c - h_c$)、直立壁の高さ、ケーソン高さによって無次

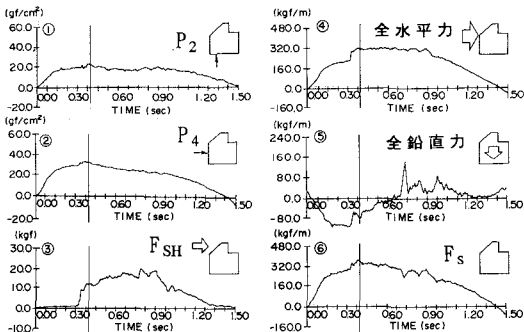


図-3 波圧・波力の時系列 (基本型)

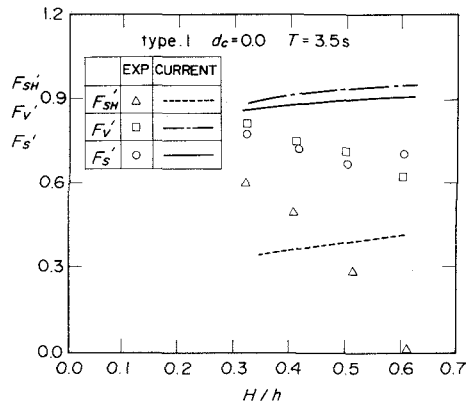


図-5 F_{SH}' 、 F_v' 、 F_s' (基本型)

元化している。

F_V' および F_S' については、 H/h のほぼすべての範囲にわたって実験値は現行設計法を下回っている。また、各波力とも実験値は、 H/h の増大とともにほぼ単調に減少し、高波浪に対して上部斜面堤がねばり強い構造であることを示している。 F_{SH}' については波高水深比が 0.55 を越える場合には、滑動合成波力が最大となる位相で波面が上部工に到達していないため、ほとんど 0 に近い値となっている。しかしながら、現行設計法による各波力の算定値は H/h が大きくなるにつれて増大しており、上部斜面堤のねばり強さを適切に表現できない。

4. 斜面形状の改良効果

図-6, 7, 8 は実験に用いた各堤体形状に対する F_{SH}' , F_V' , F_S' をそれぞれ比較したものである。周期は 2.6 s である。また、各図中には現行設計法による算定値も示す。 F_{SH}' についてみると通常の上部斜面堤 type 1, 2 に比して半没水型上部斜面堤 type 3~4 が大きな値を取る。これは type 1, 2 の斜面が、堤体の高い位置にあり波力が小さく、また、 F_S がピーク時に波が斜面に十分到達していないためである。3 つの半没水型上部斜面堤を比較すれば、天端の低い type 4 や斜面下端水深の深い type 5 が比較的小きな値を取る。

F_V' は、斜面下端が静水面上に出ているものほど高い値を取り、半没水型上部斜面堤は、それに比して小さな値を取る。また、半没水型上部斜面堤の中では、斜面下端水深の最も深い type 5 が比較的小きな値を取る。

F_S' については同一天端高さである type 1~3 を比較すれば斜面の長さが最も長い type 3 が比較的小きな値を取り、斜面が最も短い type 2 が最も大きな値を取る。

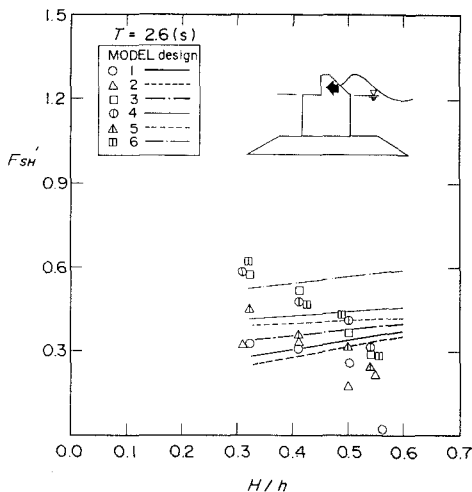


図-6 F_{SH}'

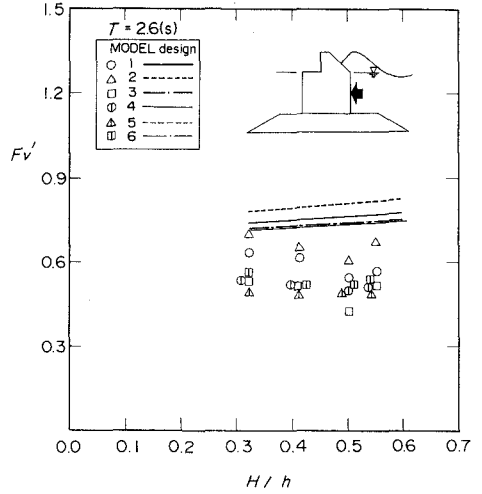


図-7 F_V'

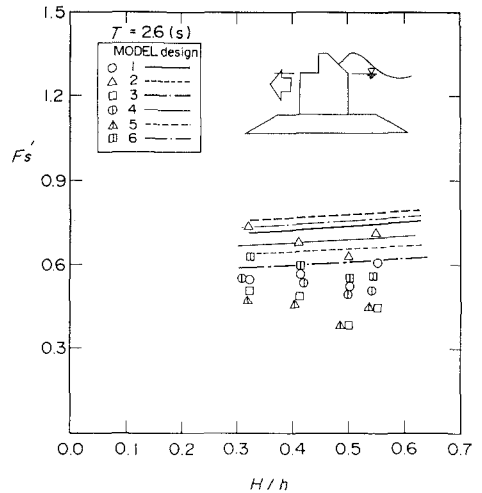


図-8 F_S'

また、type 4~6 では斜面の下端水深が最も深い type 5 が最も小さい値を取る。以上の結果から、上部斜面堤の斜面形状を改良し、斜面の影響を強調することによって耐波安定性をより向上させることがわかる。

5. 波高伝達率

図-9 には周期 2.6 s の場合の波高伝達率 K_T を hc/H_i に対して示している。 H_i は入射波の有義波高である。基本型 (type 1) では上部斜面堤の設計に用いる hc/H_i が 1.0 付近では K_T は 0.15 程度であるが、 hc/H_i が 0.75 付近では 0.2 程度となっている。同一天端高を持つ type 1~3 および 4~6 について構造の影響をそれぞれ比較すれば、斜面下端水深が深く斜面の影響を強調したものほど

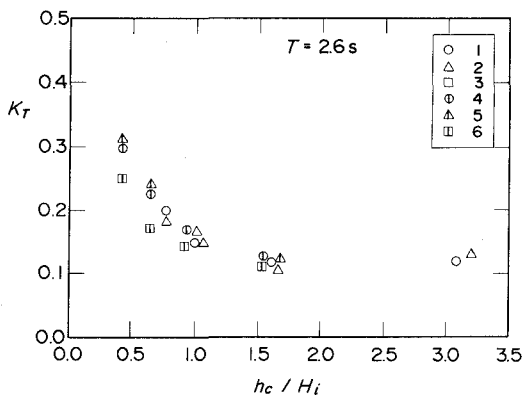


図-9 波高伝達率

高い波高伝達率となっている。また、斜面角度 θ が大きいほど波高伝達率は小さくなる。 θ が 56° の場合 (type 6)、 h_c/H_i が 0.6 程度でも K_T が 0.2 を満たしている。なお、離島港湾における防波堤は、高波高時の越波を許容する事を前提としている。例えば、 $h_c/H_i=0.4$ とかなり低天端になった場合には、最も波高伝達率が高い type 5 でも K_T は 0.32 である。なお、本研究では詳細な検討を加えていないが、斜面に切れ込みをいれる等の工夫により、波高伝達率が低減できることが報告されており(佐藤ら, 1992) ここに示した上部斜面堤においても波高伝達率を低減する有効な方法であると思われる。

6. 新設計法

(1) 上部斜面部に作用する水平波力 F_{SH} の算定法

上部斜面部に作用する波力を評価する新たな方法として以下の式を提案する。

$$F_{SH} = \lambda_{sl}' F_i \sin^2 \theta \quad \dots\dots\dots (1)$$

F_i は上部斜面部と同じ高さを持つ直立壁に作用する合田公式によって算定される波力である。上式は現行設計

法の式に波力低減係数 λ_{sl}' を導入したものであり、 λ_{sl}' が 1.0 の場合、現行設計法と同じである。図-10 は実験値から逆算した λ_{sl}' を波形勾配 H/L に対して示す。図中の実線はここに提案する λ_{sl}' である。すなわち λ_{sl}' は H/L とともに低減するが、直立壁の水平波力を上回ることがないと考え、 λ_{sl}' の上限は $\sin^{-2} \theta$ であり、また λ_{sl}' は 1.0 を下回らないとしている。したがって

$$\lambda_{sl}' = \min [\max \{1.0, -23H/L \tan^{-2} \theta + 0.46 \tan^{-2} \theta + \sin^{-2} \theta\}, \sin^{-2} \theta] \quad \dots\dots (2)$$

となる。なお、図の点線は $\theta=56^\circ$ の type 6 の場合の λ_{sl}' である。また、斜面に作用する鉛直波力は式 (1) を用いて求められた水平波力に $\tan \theta$ を除して求める。

(2) 直立壁に作用する水平波力 F_V の算定法

上部斜面堤の鉛直壁に作用する水平波力を評価する新たな方法として以下の式を提案する。

$$F_V = \lambda_V F_2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

上式は現行設計法による波力 ($F_V = F_2$) に波力低減係数 λ_V を導入したものである。図-11 には実験値から逆算した λ_V の値を波形勾配 H/L に対して示す。図中の $\lambda_V=1.0$ の点線は現行設計法に対応する。 λ_V は H/L が大きいほど小さくなっている。ただし、type 2 は、他の堤体に比して高い値をとる。このことを考慮し、 d_c が正の値となり(斜面下端が静水面上) 大きくなるにつれ、 λ_V が 1.0 に漸近すると考えると以下の式が得られる。

$$\lambda_V = \min [1.0, \max \{1.1, 1.1 + 11d_c/L\} - 5.0H/L] \quad \dots\dots\dots (4)$$

なお破線は $d_c=8$ cm の type 2 の場合であり、実線は半没水型 $d_c \leq 0$ の場合である。

(3) 滑動実験による検証 (基本型)

図-12 には、基本型上部斜面堤に対して実施した滑動実験の結果を示す。縦軸は模型ケーソンの堤体水中重量 (W)、横軸は波高水深比 H/L である。図中の白抜ききの四角は滑動しなかったことを示し、二重の四角は滑動した

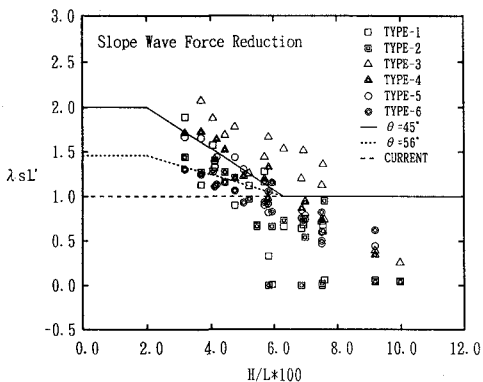


図-10 λ_{sl}'

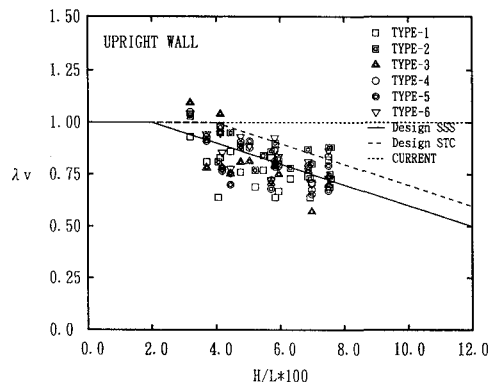


図-11 λ_V

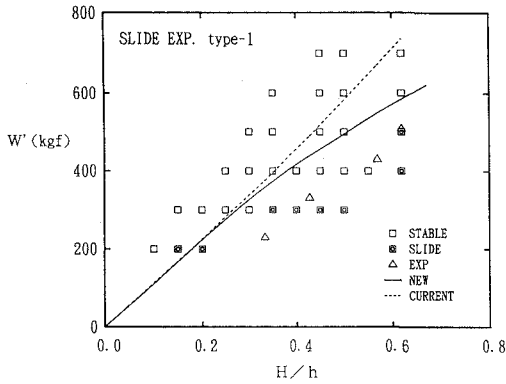


図-12 滑動実験

ことを示す。 H/h に対する W' の増加率は H/h の増加に伴い小さくなっており、上部斜面堤が波高の増大に対してねばり強い耐波安定性を有していることがわかる。図中には現行設計法（図中点線）および今回新しく提案した設計法による滑動限界重量の算定値（図中実線）を示す。現行設計法による算定値の増加率は H/h の増加に伴いさらに大きくなっており、上部斜面堤のねばり強さが表現されない。これに対して新しく提案された設計法では H/h に対する W' の増加率は小さくなっており堤体のねばり強さがよく表現されていることがわかる。

(4) 各形式の滑動合成波力

図-13は基本型および斜面形状の改良を施した5つの堤体について、実験結果及び新しく提案された設計法による滑動合成波力の値を比較するものである。また、基本型と同じ高さの直立混成堤に対する合田公式による波力（図中 VW）を比較のために示している。波の周期、波高はそれぞれ 3.6 s, 61.9 cm である。斜面下端水深が深く、天端の低い構造ほど波力が低減しており、さらにねばり強い構造であることがわかる。直立の混成堤に対して上部斜面堤ではおよそ 30 から 40 % ほど波力を低減できることがわかる。新しく提案された設計法による算定値は、やや安全側となるが構造形状の変化をよく表している。上部斜面部の形状を改良すれば、さらに離島港湾に適した上部斜面堤の形状が提案できることがわかる。また、新しく提案された設計法を用いれば形状の改良効果を加味した波力の算定が可能となった。

7. まとめ

今回の研究において得られた知見は以下の通りであ

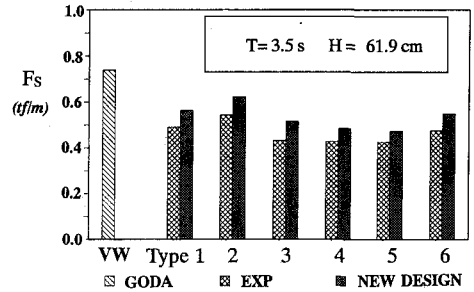


図-13 各堤体の滑動合成波力

る。

- ① いづれの上部斜面堤も、直立の混成堤に比して 30~40 % ほど滑動合成波力が低減されている。上部斜面堤の中では、斜面下端水深が深いものほど滑動合成波力が低減されている。また当然ではあるが、斜面角度が緩く天端が低いものほど耐波安定性が高い。
- ② 上部斜面に作用する波力およびケーソン直立部に作用する波力の算定法を新しく提案した。新算定法では、波力を波形勾配 (H/L) や斜面勾配 (θ) を含む式で提案しており、標準的な上部斜面堤はもとより改良型にも適用できる。
- ③ H/h の増大とともに必要堤体重量の増大率は減少しており、上部斜面堤が設計波高以上の波に対しても十分安定なねばり強い構造であることを示している。新しく提案された設計法は、ねばり強さの特性が現行設計法を用いる場合よりもよく表現できる。

なお本研究は、伊豆諸島海域への新たな海上交通システムの導入調査委員会（シップアンドオーシャン財団）によるものであり、委員長の酒匂敏次東海大学教授、委員の渡辺晃東京大学教授、高山知司港湾技術研究所水工部長、田端竹千穂（前）沿岸開発技術研究センター第一調査研究部長他の各位から多大なる御支援・御助言を得た。ここに記して深甚なる謝意を表する。

参考文献

- 佐藤孝夫・山縣延文・古川正美・高橋重雄・細山田得三 (1992): 消波ブロック被覆上部斜面堤の水理特性—那覇港大水深域における新構造防波堤の開発—, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 556-560.
- 中田邦夫・池田竜彦・岩崎三日子・北野雅三・藤田 隆 (1983): 上部斜面堤の現地建設に伴う水理模型実験, 第 30 回海岸工学講演会論文集, pp. 313-316.
- 森平倫生・国田 治 (1979): 斜面堤の水理特性に関する模型実験, 第 26 回海岸工学講演会論文集, pp. 295-298.