

軟弱地盤着底式防波堤の開発について

運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所（前） 正会員 門 司 剛 至

同上 正会員 村山伊知郎

同上 正会員 元 野 一 生

同上 高 田 直 和

1. はじめに

近年の港湾整備は、ますます厳しい自然条件下で行われることが多くなってきた。第四港湾建設局管内においても有明海に面した熊本港の厚さ40mに及ぶ沖積粘土層上に防波堤を建設する必要性が起こった（図-1）。このような超軟弱地盤上に従来型の防波堤を建設すると設計波高は小さくとも、支持力の面から本格的な地盤改良が必要となり、建設工費は膨大となる。そこで、防波堤本体をできる限り軽くするとともに底版を広くすることにより、地盤改良を不必要とする軟弱地盤着底式の構造が考え出された。

この新しい形式の防波堤の開発のため、実物大堤体を使った現地載荷試験ならびに実証観測や室内模型実験等を行った。これらの検討により、軟弱地盤着底式防波堤の基本的な設計法が確立されたため、62年度には熊本港南防波堤の建設に軟弱地盤着底式防波堤を採用し、本工事に着手した（写真-1）。

本報告は、これら一連の実験の成果をふまえ、軟弱地盤着底式防波堤の設計の考え方を示したものである。

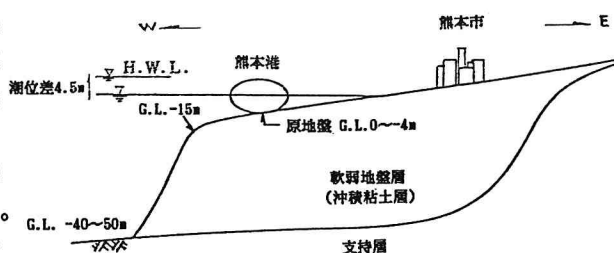


図-1 有明海の地質

2. 軟弱地盤着底式防波堤の発想

軟弱地盤着底式防波堤（以下「軟着堤」と呼ぶ）は、地盤改良をしない軟弱地盤上に重量の軽い堤体を直接設置する新しい型の防波堤である。基本的な原理は、堤体底面と粘性土表層との付着力により水平外力に抵抗するものである。付着力は基本的には堤体重量に無関係であるため、堤体重量を軽くすることができ、その結果地盤改良が不要となる。このため、波高が小さく表層地盤がある程度の強度を持つ軟弱地盤海域において、経済的な防波堤となる可能性がある。

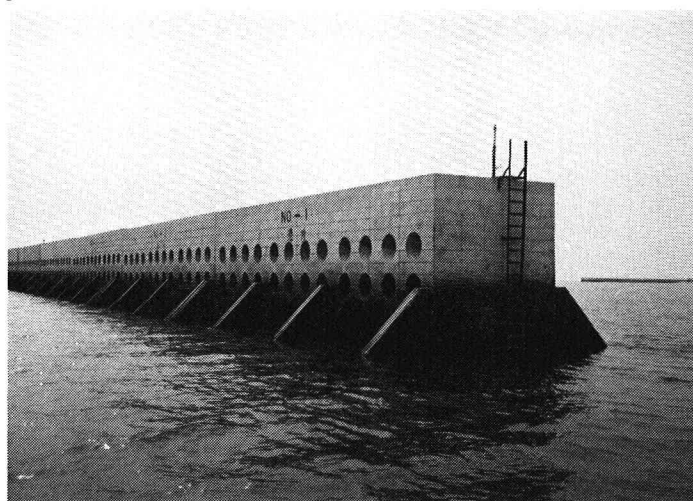


写真-1 熊本港に設置された軟弱地盤着底式防波堤

最も基本的な上部工の形状は「逆T型」と呼ばれるもので、この構造は波を防ぐ鉛直壁部と地盤と接触し付着力を発揮する底版部から構成されている（図-2）。また、底版部の形状により「平型」と「くし型」の2タイプがあり、「くし型」は「平型」では滑動抵抗力が不足する場合に、底版から短い杭を打設し杭の横抵抗力で水平外力に抵抗するものである。

3. 軟着堤の設計法

(1) 水理特性

ここでは、長期実証試験に用いた逆T型軟着堤と、熊本港南防波堤として事業化した逆π型（消波・透過型）軟着堤の水理特性を示す。これらの水理特性は水理模型実験により解明した。

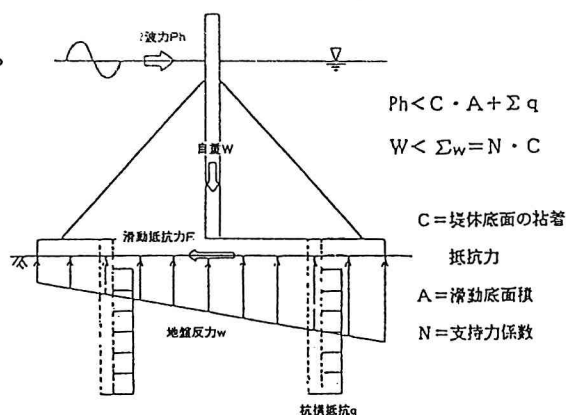


図-2 軟着堤の基本原理

①逆T型軟着堤の水理特性

水平波力は合田式により推定が可能である。鉛直波力は、底版長が長くなるに伴って、底版前端的鉛直波圧は減少し、底版前し長 $l_1 = (\text{入射波の波長 } L_A)/4$ において底版前端的鉛直波圧は0となる。それを超えて底版長がさらに長くなると、底版前端的鉛直波圧は負に転じる。底版前端的鉛直波圧は $P_3 \cos(2\pi l_1/L_A)$ で表すことができる(図-3)。

②逆π型軟着堤の水理特性

全水平波力は逆T型と同様合田式で推定できるが、透過型のため遊水室幅、前・後壁開口率及び開口部の形状、天端高さの影響を受け堤体に作用する波力が変化するので、所要の反射・伝達率を満足する開口率、遊水室幅等を決定したうえで合田波圧に対する低減率を求める必要がある。また、前側の底版上面に作用する鉛直波圧は、逆T型と同様である。

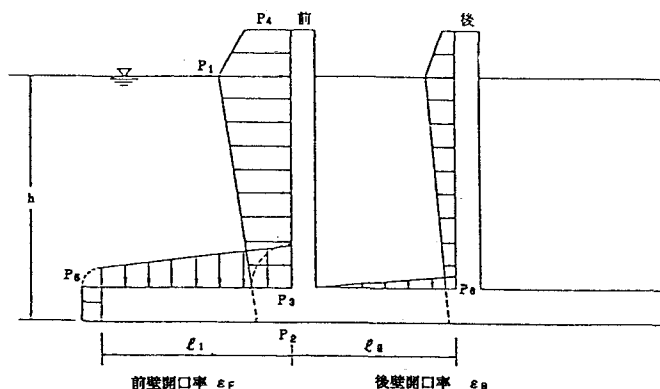
③安定計算における波力の与え方

①②をもとにして、押し波時、引き波時に波力を算定し、堤体の安定計算を行う(図-4)。ただし軟着堤の場合、鉛直波力最大時にも支持力について危険となる可能性があり、この場合の安定計算も必要である。

(2) 堤体の安定性

①支持力

軟着堤の支持力の推定法は、偏心傾斜荷重を受ける粘性土地盤上の浅い基礎の支持力問題と定義づけられる。現地載荷試験及び遠心載荷実験の結果と、中瀬・小林の式、Vaughan 他、Meyerhofの式、土木研究所の方法の各支持力式による理論値の比較によると、軟弱な正規圧密に近い地盤上に軟着堤を設置する場合、支持力評価にはVaughan 他、の式を用いることが適当であると考えられる(図-5)。



前壁：合田波圧 $\times (1 - \varepsilon_F)$

後壁：合田波圧 $\times 0.15 \times (1 - \varepsilon_R)$

前側底版：逆T型と同じ考え方

中央底版：上図のような三角形分布を仮定

$P_1 \sim P_4$ は合田式で算定

$P_5 = P_3 \times \cos\left(\frac{2\pi l_1}{L}\right)$ L : 波長(底版上水深における)

$P_8 = 0.15 \times P_3$

ただし、0.15は実験結果より決まる定数

図-4 波力の考え方

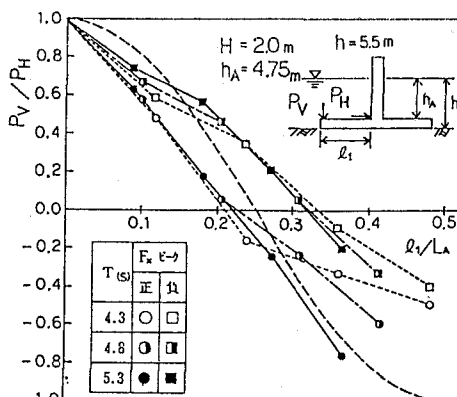


図-3 底版前端的における波圧の低減率

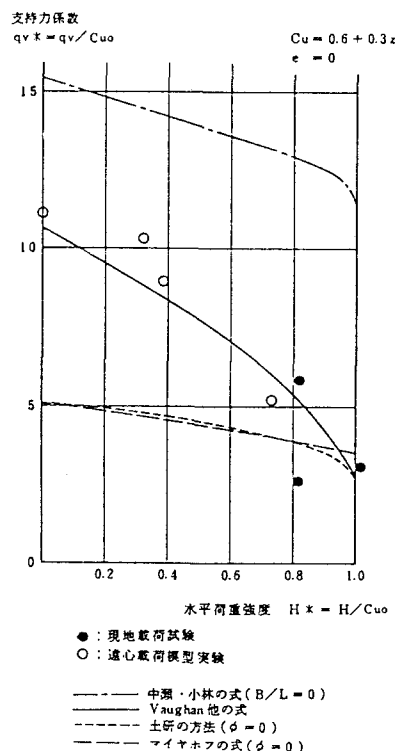


図-5 支持力式の比較

②「平型」の滑動抵抗力

平型の滑動抵抗力は基本的には堤体底面の付着力と、付着力を発揮する面積の積で与えられる($F = C \cdot A$)。これには、付着力を発揮する底面積 A の考え方が未解明であるため、遠心載荷試験の結果と、Meyerhofの有効基礎中の考え方、底面反力的考え方による理論値を比較した(図-6)。

実験値は、2つの考え方による計算値のほぼ中間に位置しているが、Meyerhofの有効基礎幅による考え方は各実験値の下限值を与えているため、設計にはこの方法が良いと思われる。

③「平型」の破壊包絡面

①②の検討結果より、「平型」の破壊包絡面は、鉛直荷重、水平荷重及び偏心量の空間において図-7のように表示できる。なお、鉛直力が非常に小さな領域では、滑動抵抗力も小さくなるため、滑動抵抗力を期待するためには、ある程度の大きさの鉛直荷重が必要である。

④「くし型」の滑動抵抗力

「くし型」の滑動抵抗力は、現地載荷試験及び室内模型実験の結果より次のとおり考える。

1) 短杭の極限抵抗力はBromsの式により推定できる。

2) 「くし型」堤体に杭を2列配置した場合は、1列分の杭の抵抗力のみが期待できる。

3) 「くし型」の底面付着力による抵抗力については、現時点では抵抗力に見込まない。

(3) 地盤強度の評価方法

①土質試験

堤体の安定性は「平型」・「くし型」とも粘土の非排水せん断強度 (C_u) で検討する。軟弱な粘土に対しては、サンプリング時の乱れの影響が大であることから基本的にベーンせん断試験によることとし、ベーン試験を補完するため、三軸 (C_u) 試験を実施することとする。

②圧密による強度増加

粘性土地盤上に堤体を設置した場合、堤体設置圧により地盤が圧密され、せん断強度が増加すると考えられる。しかし、実証観測の結果では、強度が増加するまでに数十日~数百日の長い時間を要するため、現時点では設計にあたり強度増加を見込んでいない。

③くり返しによる強度低下

粘性土地盤にくり返し荷重が作用した場合は、静的に荷重が作用した場合に比べて小さな荷重レベルで破壊に至ることが知られている。室内模型実験や繰り返し三軸試験の結果により、「平型」の設計に於いては、表層地盤の粘着力 C_{u0} を3割程度小さく評価することにより、くり返しによる強度低下に対処できると考えられる (図-8)。「くし型」の強度低下の評価は今後の検討課題であるが、「くし型」の滑動抵抗力において底面付着力を無視するなど安全側の考えを採っており、現段階では繰り返しによる強度低下を特に見込まなくても堤体の安定性は損なわれないものと考えている。

④安全率

軟着堤の安全性を検討する上で、誤差を生じさせる要因のうち最も大きな影響を及ぼす (誤差が大) ものは地盤強度の評価であると考えられる。現地載荷試験による支持力についての実験値のバラツキとVaughan 他 の支持力式 (理論値) との比較を参考に、軟着堤の場合は滑動・支持力ともに安全率1.5を当

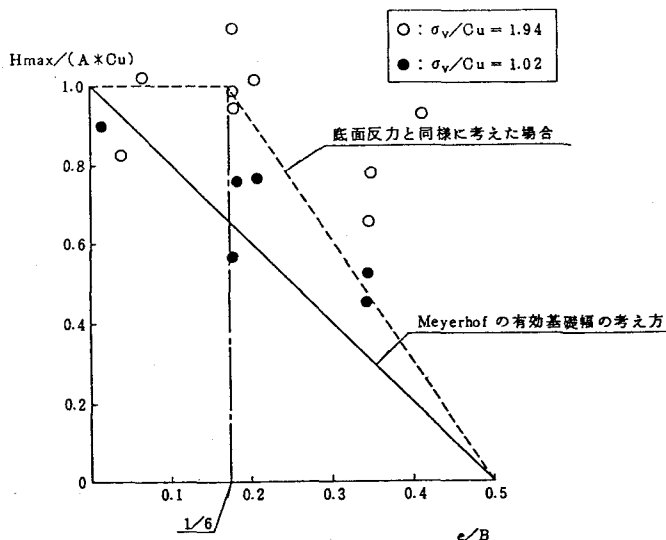


図-6 滑動抵抗力の計算と実験値の比較

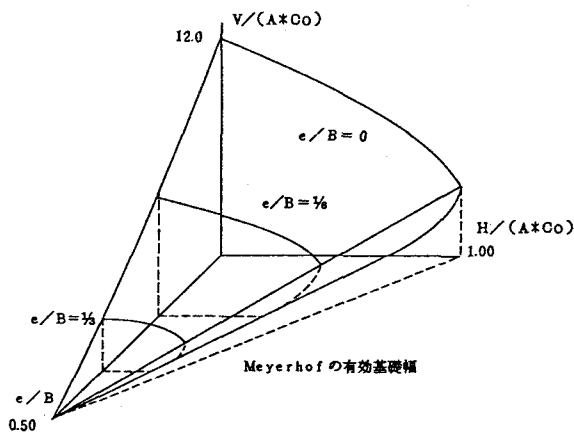


図-7 鉛直荷重・水平荷重・偏心量の空間での破壊包絡面

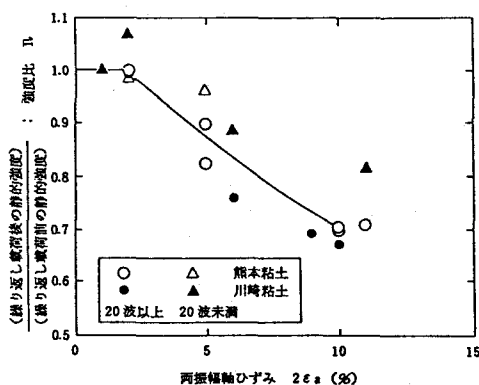


図-8 強度比と発生両振幅軸ひずみの関係

面採用することが妥当であると判断した。しかし、安全率については、今後実績を積んだうえでさらに検討する必要がある。

4. 施工上の問題点

①洗掘防止工

軟着堤の特性により、揚圧力防止のため洗掘対策は必ず必要であり、実証観測の結果、洗掘防止工としてはアスファルトマットが適切と考えられる（図-9）。

熊本港南防波堤では、アスファルトマットを採用することにしたが、施工後も定期的に観測を行うなど、管理が必要であると考えられる。

②地盤の不陸への対応

軟着堤を設置する地盤に不陸がある場合は、そのままの状態では堤体を設置すると

i) 表層地盤を乱すことにより地盤強度が低下する。

ii) 堤体と地盤の間に隙間が開き、揚圧力が発生する危険性がある。

などの問題が生じる。また、堤体の傾斜を防ぐためにも、ある程度の整地が必要であると考えられる。熊本港においては、不陸が現状で最大30cm程度あり、カッティング、敷き砂等により10cm以下にすることとしている。

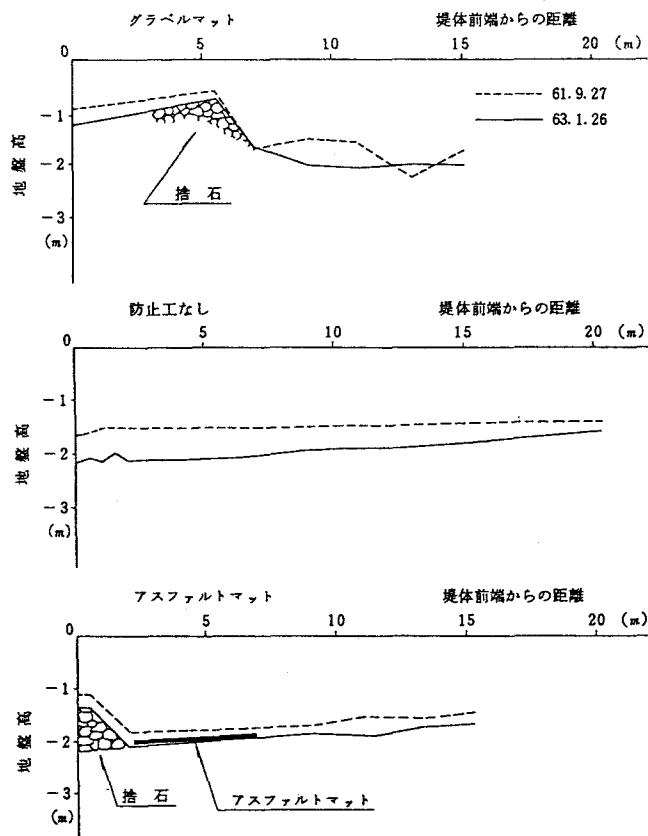


図-9 洗掘防止工別の洗掘状況

5. 軟着堤の適用性

基本的には、他型式防波堤と総合的な比較となるが、ここでは便宜上、施工性と経済性の2面から評価した。

(1) 施工性の面から堤体幅 $B=20\text{m}$ を1つの目安とすると、軟着底の適用限界は、

$$\text{表層地盤強度 } C_{u0} > 0.3 \quad \text{tf/m}^2$$

$$\text{水平波力 } Ph < 20 \quad \text{tf/m}$$

$$h < 10 \sim 12 \text{ m} \quad \text{となる。}$$

(2) 経済性の面から熊本港での設計条件で重力式防波堤とのコストを比較した。

$$\text{重力式防波堤} \quad 340 \text{ 万円/m}$$

$$\text{軟弱地盤着底式防波堤} \quad 170 \text{ 万円/m}$$

となり、軟着堤の経済的なことがわかる。

6. おわりに

軟着堤の安全性を検討する際、誤差を生じる可能性が一番高いのは表層地盤強度の推定である。土質試験の計画を綿密に行うとともに、できる限り多くのデータを集めることが必要である。また、洗掘対策も、アスファルトマットを使用しているが長期的な波浪に対しては、今後とも定期的な観測が必要である。この外「くし型」の抵抗力の考え方については、未解明な点が残されており、今後も継続して実験・検討を行う予定である。最後ではあるが、軟着堤の開発に当たっては、運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所と同熊本港工事事務所が中心となり、港湾技術研究所土質部、設計基準部の指導・助言を受けて行ったものである。また、解析・設計法の検討に際し、東京工業大学 中瀬教授、筑波大学 沢口教授、熊本大学 鈴木教授、(財)沿岸開発技術研究センター 奥村常務理事をはじめとする関係各位にご指導頂いた。厚く感謝する次第である。

参考文献

1) 谷本勝利, 本 浩司, 石塚修次, 合田良実: 防波堤の設計波力算定式についての検討, 第23回海岸工学講

演論文集, pp.11 ~16, 1976.

2) 中瀬明男, 小林正樹: 偏心傾斜荷重を受ける粘性土地盤上の基礎の支持力, 港湾技術研究所報告, 第9巻, pp.23 ~38, 1970.

3) Vaughan, P.R., et al.: Stability analysis of Large gravity structures, BOSS'76, pp.467~487, 197

4) G.G.Meyerhof.: The Bearing Capacity of Foundations under Eccentric and Inclined Loads, Proc. 3rd Int. Conf., S.M.F.E., Vol.1, pp.440~445, 1965.

5) 日本道路協会: 道路橋下部構造設計指針、橋台、橋脚の設計編、直接基礎の設計、pp.34 ~42、昭和43年

6) Broms, B.B.: Design of laterally loaded Piles, Proc. ASCE, Vol.91, pp.79~99, 1965.