

軟弱地盤着底式くし型構造物の 合理的設計法の提案

PROPOSAL OF NEW DESIGN METHOD FOR SOFT LANDING BREAKWATER WITH PILES

菊池喜昭¹・渡邊和重²・榎園光廣³・山本 悟⁴・幸福辰己⁵
Yoshiaki KIKUCHI, Kazushige WATANABE, Mitsuchiro ENOKIZONO,
Satoru YAMAMOTO, Tatsumi KOUHUKU

- ¹正会員 博(工)独立行政法人 港湾空港技術研究所 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)
²工修 国土交通省 九州地方整備局 下関港湾空港技術調査事務所 (〒750-0066 下関市東大和町2-29-1)
³国土交通省 九州地方整備局 熊本港湾空港工事事務所 (〒861-4115 熊本市川尻2-8-61)
⁴国土交通省 九州地方整備局 下関港湾空港技術調査事務所 (〒750-0066 下関市東大和町2-29-1)
⁵正会員 前国土交通省 九州地方整備局 下関港湾空港技術調査事務所 (〒750-0066 下関市東大和町2-29-1)

A soft landing breakwater was originally proposed for the site where ground condition is not good but wave condition is rather mild. First design method was proposed in 1991. It was much simplified and suited for limited conditions. That is the reason why the structure is used only in Kumamoto Port. Nowadays even in Kumamoto Port, the wave condition of the construction site is severer and the limitation of existing method is clarified. In this paper, the results of field loading test done in 2002 are examined to discuss the characteristics of lateral resistance of soft landing breakwater with piles and new design method is proposed.

Key Words: *Soft landing breakwater, pile, design method, field test*

1. はじめに

波力が小さく、地盤条件があまり良くないところに防波堤を建設する際には、一般的に用いられているような重力式の防波堤を建設すると非常に無駄が多いものとなることが考えられる。その最大の理由は、防波堤自身の重量を支えるために基礎地盤の地盤改良が必要となることである。これを避けるためには、なるべく軽量化された防波堤構造を考案する必要がある。そこで、従来考えられたことがなかった新しいタイプの防波堤構造が考案された。それは、粘性土地盤の表面と堤体底面の付着力で水平力に抵抗することを基本的思想とした軟弱地盤着底式の防波堤である。この形式の防波堤として、当初は粘性土地盤表面と堤体底面の付着力で抵抗する形式(ひら形)が考案されたが、その後、水平抵抗の増加が必要との判断から、ひら形の底版に複数本の杭を打設した「くし形」が考案された(図-1¹⁾)。実際には、「くし形」が熊本港で実用化された。

熊本港での実利用から約10年が経過し、防波堤の延長が伸びてきて、水深が深くなったため、設計法開発時に想定していた前提条件を逸脱する条件下での利用を検討する必要が出てきており、水深が浅く波力の小さかった場合には問題とされなかった従来設計法の不合理性が顕在化してきた。

本研究は、くし形構造物に関する室内模型実験結果と現地模型実験結果を再検討し、軟弱地盤着底式防波堤の合理的設計法を提案するとともに、平成14年に実施した熊本港での実大モデル現地載荷試験による新設計法の妥当性の実証を行ったものである。

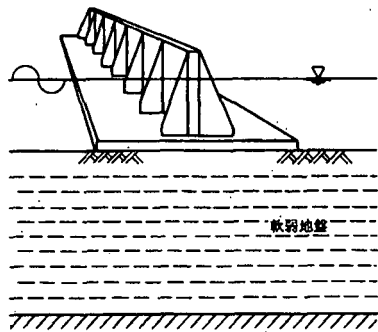
2. 既往の設計法とその問題点

軟弱地盤着底式くし形防波堤の設計に用いられてきた指針(案)¹⁾は、平成3年に策定されたものである。この指針(案)では、ひら形とくし形を比較設計し、その結果に基づいて構造を決定することになっている。また、この指針(案)で考えているくし形では杭の根入れは短いものに限定しており、このため、一般的な設計可能条件として、底版の幅が20m以下、表層地盤強度 c_{u0} が3 kN/m²以上、水平波力200 kN/m以下を適用の目安として制限している。

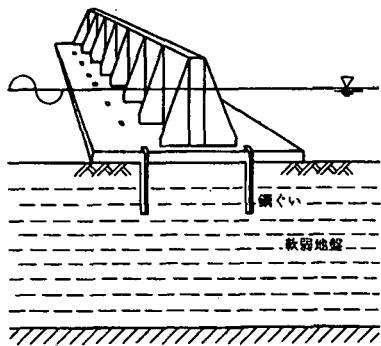
指針(案)における設計の考え方は以下のようなものである。

くし形構造の場合の水平抵抗はすべて杭で受け持つものとし、杭の抵抗は極限抵抗を考え、Broms²⁾の示した杭頭固定短杭の抵抗となるとしている。

$$F = \frac{1}{2} n \cdot 9c_u \cdot B(L - 1.5B) \quad (1)$$



(a) ひら形



(b) くし形

図-1 二種類の軟弱地盤着底式構造物

ここに、 F : 水平抵抗力, n : 杭の本数, c_u : 粘性土の粘着力, B : 杭幅, L : 杭の根入れ長さである。

式(1)に1/2とあるのは、くし形堤体に杭を2列配置した場合には1列分の杭の抵抗力を期待するものとするの現れである。指針(案)でこのような計算方法をとるに至った理由として、現地載荷試験の結果から、杭を2列配置したくし形の水平抵抗メカニズムとして、外力が大きくなり変位が大きくなると、Bromsの杭頭固定短杭の極限抵抗力で杭の水平抵抗を計算した場合に1列分の抵抗に相当する抵抗が認められたからとするものである。

鉛直支持力については、杭の引抜き抵抗、押込み抵抗を考慮しないこととしている。これは、杭の根入れが短いため、杭の支持力抵抗の確実性があまりなく、抵抗力も小さいためである。また、波力が水平力として作用した場合には、偏心荷重が作用することになるが、この場合には、図-2に示すような力の釣り合いを考えるとともに、Meyerhofの有効基礎幅の考え方⁹⁾に従って地盤の支持力を評価することとしている。

この指針(案)では杭は可能な限り短いものを用いることを推奨している。その理由として、この設計法では、水平力のすべてを杭に負担させていること、杭の水平抵抗に及ぼす地盤の反力分布としてはBromsの仮定を導入していること、杭の押込み、引抜き抵抗を見ていないことから、図-2に示すように杭の根入れ長さが長くなるほど堤体に作用する回転モーメントが増大し結果として端し圧が増大するためとしている。

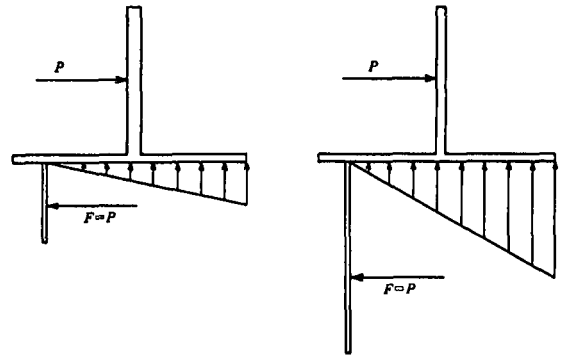


図-2 杭の根入れ長の増加による端し圧の増加

また、この設計法では、杭頭固定条件のBromsの短杭の極限抵抗の式を導入しているため、杭と底版との連結部は杭頭の固定条件を満足するように設計するように薦めている。

以上の設計法の考え方を見ると力学的に不条理な点がいくつか見受けられる。しかし、この指針(案)の段階では、未解明な部分や不確定な要素が多々あったため、当時の技術段階としてはやむをえなかったものと考えられる。

3. 新設計法の提案

熊本港では、最初の軟着底式防波堤の建設が始まってから10年以上の年月がたっており、何度か大きな台風にも遭遇している。しかし、これまでの防波堤の変状調査の結果によると、多少の沈下現象は見られるものの、堤体が大きく傾いたり変位したものはまったく見られない。さらに、水深が深くなることによって、当初の設計の前提条件を超えるような条件での建設の可能性が高くなってきており、また、指針(案)に従って設計をすると堤体が非常に大きなものとなり経済的なメリットが失われるおそれが出てきた。

そこで、指針(案)策定後に実施してきた室内模型実験結果、現地模型実験結果を再整理した。

室内模型実験において前後の杭の間隔を変えた水平載荷実験を行い、構造物の変位挙動を調べたところ、前後の杭の間隔が広がることにより、構造物の水平抵抗が増加することを確認した⁹⁾。また、現地において杭の根入れ長を変化させて行った実大模型実験を行ったところ、根入れ長が短い場合には杭の引きぬけが生じて堤体が回転しやすくなった(図-3⁹⁾)。根入れ長さを長くすることが水平抵抗の増加に効果があることを示している。これらのことは、くし形構造物の設計を考える上で杭軸方向の抵抗を考慮することの重要性を示している。

指針(案)では、杭の抵抗は杭頭固定条件のBromsの考え方が適用できるとした。しかし、現地における模型の載荷試験結果を見ると図-4に示すように杭

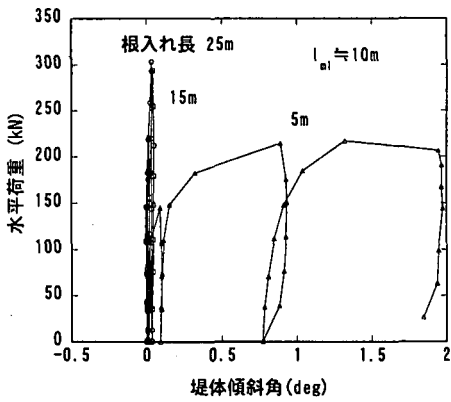


図-3 杭の根入れ長の違いによる堤体の回転量の違い

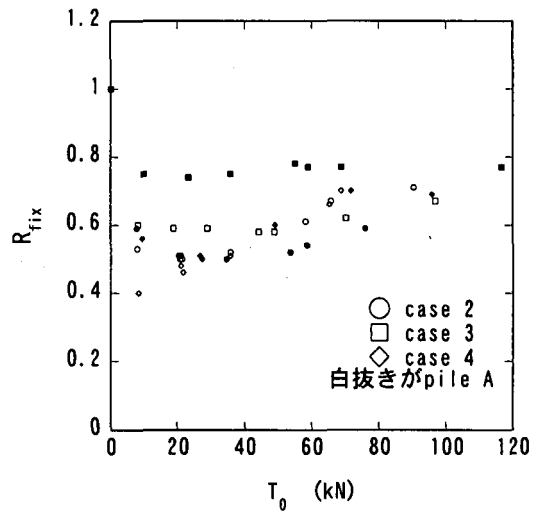


図-5 杭頭部の固定度の変化

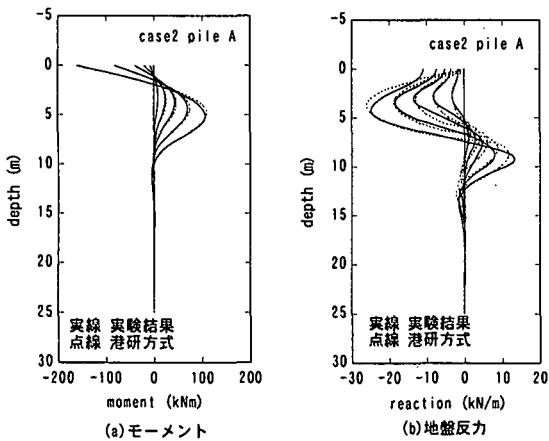


図-4 現地模型実験結果と港研方式のS型のモデルの比較

の挙動は港研方式のS型の仮定をした場合に挙動が最もよく合うことがわかった⁹⁾。また、図-5に示すように杭頭部は完全固定の状態からは程遠く、杭頭部の固定度を考慮する必要があることがわかった⁹⁾。なお、ここで言う杭頭固定度 R_{fix} とは、杭頭固定の場合の杭頭モーメントに対する実際に作用している杭頭モーメントの比のことを言う。

前後の杭の間隔が杭の横抵抗に及ぼす影響について室内模型実験で調べたところ、横抵抗に及ぼす群杭効果は杭径と杭間隔だけで規定することは困難であるが、前後の間隔が杭径の5倍以上あれば群杭の影響は考慮する必要がないことがわかった⁹⁾。実際、現地における杭幅は高々50cm程度、前後の杭間隔は5m以上となるのが普通であるので、杭間隔が狭いことによる杭の横抵抗の低下は考える必要はない。

さらに、この構造物では、波力のような繰返し外力を受けることになる。そこで、このような現象を模擬するために、現地において交番水平荷重を作用させる実験を行った⁹⁾。その結果、同じ荷重を繰返し作用させると堤体の変位が増大することがわかった。この原因は地盤の比較的浅い部分の地盤が杭の変位によって乱されて地盤の横抵抗が低下するためにおきるものである。そこで、繰返し回数の増加によって最大荷重作用時の地盤反力係数がどの程度劣化するかについて調べたところ、粘性土地盤では、地盤の横抵抗の

劣化の程度は深度が深くなるにつれて小さくなることがわかった。また、ある程度以上の繰返し荷重を続けると地盤反力係数の低下比 R_k の低下率が低下することもわかった。さらに、最終的な横抵抗の低下の程度は荷重レベルが大きくなるほど大きくなることもわかった。これらのことを考慮して、地盤反力係数の低減率について次のような定式化を提案した⁹⁾。

$$R_k = 1 - \alpha \beta \gamma \quad (2)$$

ここに、 R_k : 地盤反力係数の低下比 (= ある繰返し回数時のある深さでの地盤反力係数 k_m /処女荷重時の地盤反力係数 k_r)； α : 最大荷重レベルによる補正係数； β : 繰返し回数の違いによる補正係数； γ : 深度の違いによる補正係数である。なお、繰返し荷重による地盤反力係数の低下はほぼ2ヵ月後には回復すること、繰返し荷重の荷重レベルが上がると低い荷重レベルの繰返しによる地盤反力係数の低下の影響はほとんどなくなることがわかった。

以上の検討結果から設計法の合理化の提案をした。主要な見直し点は以下のとおりである。

- 1) 杭の横抵抗のモデルを短杭杭頭固定条件でのBromsの極限支持力を求める式から、より現象に即した港研方式に改める。
- 2) 杭と底版の結合の剛性が堤体全体挙動に及ぼす影響が大きいことを踏まえ、杭頭部の結合状態を考慮する。
- 3) 杭に作用する押込み力、引抜き力が堤体の安定性に及ぼす影響が大きいので、それを考慮する。
- 4) 繰返し作用する荷重の影響による地盤反力係数の低減について考慮する。

4. 現地模型実験

この実験は、3.に示した新設計法の妥当性を把握するために行ったものである。この実験は、水深約-2.3mの現地において行った。この実験では、地盤・

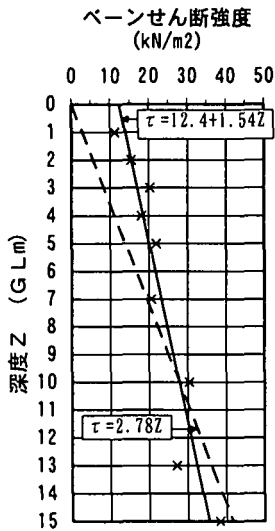


図-6 ベンせん断試験によるせん断強度の深度分布

杭の基本的な挙動特性を確認するために土質調査、単杭の水平載荷試験(最終荷重 55kN)を行ったうえで、実物大の実証試験堤(底版幅 14.9m × 高さ 8.9m × 奥行き 4.8m, 杭根入長 15m × 6本)の水平載荷試験(最終荷重 1,100kN)を行った。

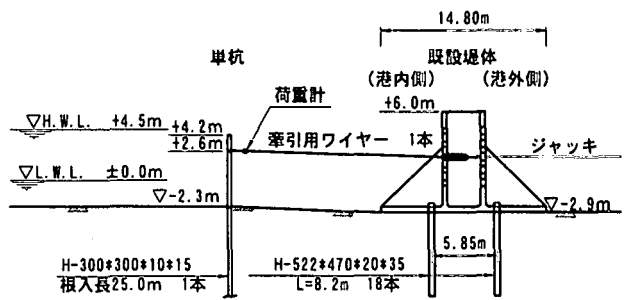


図-7 単杭の載荷試験の様子

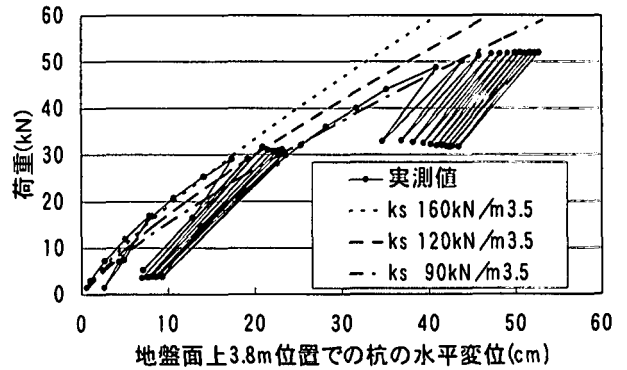


図-8 荷重と変位の関係

(1) 土質調査

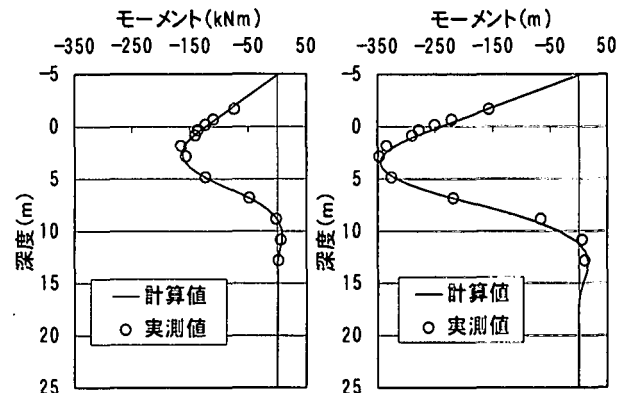
当該地点はほぼ正規圧密地盤と考えられる地盤であり、粘土質である。液性限界は概ね 60% 程度であるが、GL-6m ~ GL-12m 付近に液性限界が 100% と高い層が見られる地盤である。図-6 にはベンせん断試験によるせん断強度の深度分布を示す。この図中の×印が実測点である。この結果によると地盤のせん断強度は深度が増加するにつれて増加する地盤であることがわかる。なお、点線はこの地盤の地盤反力係数を推定するために設定した安全側の地盤の強度分布を示したものである。

(2) 単杭の水平載荷試験

図-7 に単杭の水平載荷試験の断面図を示す。単杭の水平載荷試験は地盤反力係数の把握と繰り返し荷重作用時の地盤反力の変化について調べることを目的としたものである。

図-8 には実験の結果得られた杭頭荷重と GL+3.8m での杭の水平変位の関係を示す。図-8 には推定される地盤反力係数も示してある。図-9 には実測の曲げモーメント分布と港研方式によって計算した曲げモーメント分布の比較の例を示した。この図のように、この地盤において港研方式の仮定が良く合うこと、また、地盤反力係数 k_s としては、載荷初期で $160\text{kN/m}^{3.5}$ 、最大荷重時で $90\text{kN/m}^{3.5}$ であることがわかった。

なお、図-8 に示した繰り返し載荷による杭の変位の増加と曲げモーメント分布の変化の関係から式(2)に示したような地盤反力係数の変化挙動についても概ね妥当性が把握できた。



(a) 荷重 25kN (b) 荷重 49kN
図-9 曲げモーメントの実測値と解析値の比較

(3) 実証試験堤の水平載荷試験

実証試験堤の水平載荷試験の断面図を図-10、各杭位置を図-11 に示す。載荷実験に用いた堤体は実物とほぼ同じ幅を持つ 3分の1 の長さの堤体である。図-11 に示すように試験堤には 6本の杭を用いた。杭には 25cm 角の H 型鋼を用いた。この H 型鋼は通常の設計で用いられるものより小さなサイズのものである。これは、構造物を大変位させるために杭の抵抗を小さくしたためである。根入れ長さは 15m とし、既設堤よりも長い杭を用いている。なお、このような長い杭を持つ構造はこれまでの設計法の適用範囲外である。

図-12 に載荷荷重と堤体の地表面変位の関係を示す。この図に示すように、300kN 程度までは堤体はほとんど水平移動せず、850kN 付近までは堤体の変位が小さいが、その後は大きく変位するようになる。

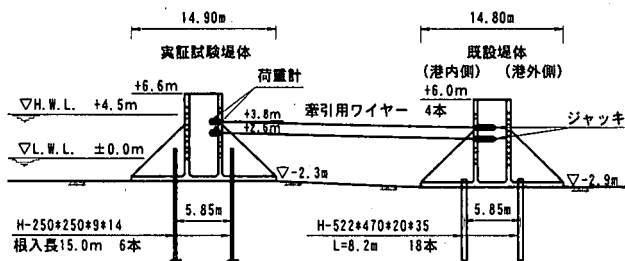


図-10 くし形模型の断面図

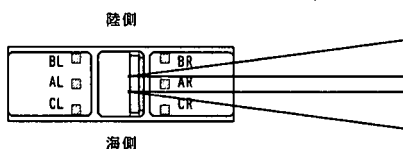


図-11 杭の配置

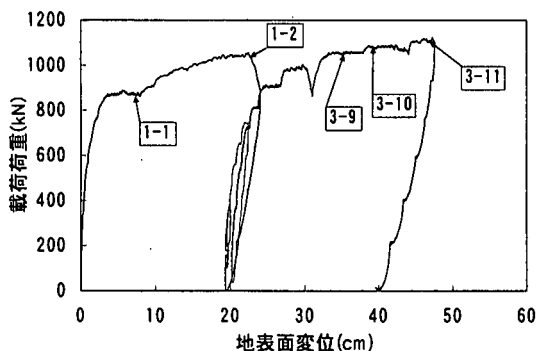
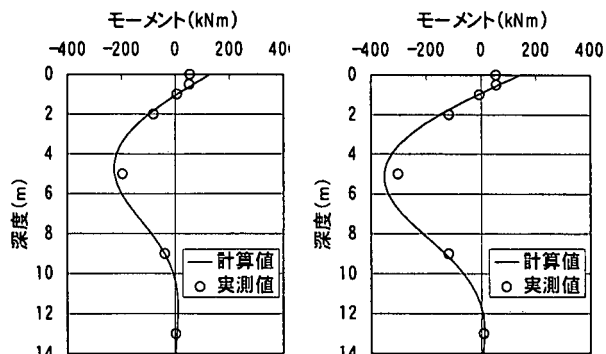


図-12 載荷荷重と地表面変位の関係

図-13には、測定された杭の曲げモーメント分布と港研方式による計算結果を示している。このときの計算では、杭頭の固定度はあらかじめ予測できないため、杭頭部付近の曲げモーメントについては実測値とあわせ、測定された変位に対応する杭頭荷重を作用させる計算をしたものである。この図に示す曲げモーメントの深度分布形状の比較から港研方式が適用できることがわかる。

すべての杭について図-13に示したような検討を行い、杭頭の固定度 R_{fix} と各杭の受け持つ水平抵抗力との関係を示したのが、図-14である。この結果によると、 R_{fix} は杭ごとに異なっており、また荷重レベルによっても変化していることがわかる。なお R_{fix} の変動の範囲は0~0.6の範囲にある。

このような測定結果をもとに、堤体に作用させた水平荷重と杭の水平抵抗力の合力の関係を示したのが、図-15である。この結果からわかるように、この構造物では、荷重レベルが低いときには底版による水平抵抗力の割合が大きい荷重レベルが大きくなると水平荷重をほとんど杭で受け持つようになる。実際、堤体の実験時の有効重量は1800kN程度であり、鉛直荷重強度は約25kN/m²であった。地表面付近の強度が12.4kN/m²であったことから、これまでの検討結果からすればこの地盤での想定される底面と地盤との間の付着による抵抗は800kN程度となる。実験結果



(a)1-2の時(S=124kN) (b)3-11の時(S=158kN)

図-13 曲げモーメントの実測値と解析値の比較(CR杭)

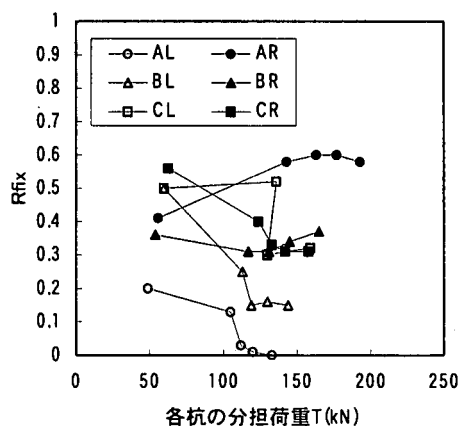


図-14 各杭の杭頭固定度の変化

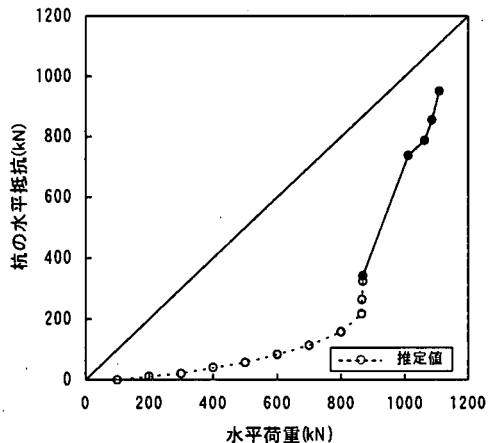


図-15 載荷荷重と杭の抵抗力との比較

は、荷重の初期は底版の付着抵抗で水平荷重に抵抗することを示している。その後、水平抵抗は急激に杭が分担することとなり、堤体の変位が増加するとともに、少しずつ堤体の水平抵抗が増加したと考えられる。

なお、堤体は最大荷重作用時に1.5°ほど回転した。このときの各杭に作用した押し込み力と引抜き力の合力は、それぞれ約300kNであった。1本の杭の極限引抜き抵抗は400kN程度であり、実験で観測された引抜き抵抗はその1/4程度に当たる。このようなことから堤体の回転挙動がほとんど生じなかったものと思われる。

以上の現地模型実験の結果から、提案した杭の横抵抗モデルの妥当性、杭の軸直角方向の抵抗を考慮することの妥当性が把握された。また、杭頭部の固定度については、ばらつきがあるものの想定すべき固定度 R_{fx} の範囲としては0~0.6の範囲にあることが把握された。

5. 提案設計法の効果

熊本港における海象条件下で従来設計法と提案設計法とで試設計を行い、設計断面の比較を行った。ここでの設計条件は、潮位がH.W.L.+4.50m, L.W.L.±0.00m, 水深は-2.30mで、波高は $H_{max}=4.50m$ ($H_{1/3}=2.70m$), 周期 $T_{1/3}=5.50sec$, 入射角度は 0.0° である。地盤条件は、図-6と同じとした。なお、提案設計法では、最大荷重を与える波力よりはやや小さい波力が繰返し作用する条件の検討もしている。

試設計結果の一覧を表-1に、従来設計法による試設計断面を図-16に、提案設計法による試設計断面を図-17に示す。新しい設計法では、杭の根入れ長が長くなるが、堤体の幅が小さくなり、杭の断面も小さなもので済むようになるため、経済的な有利性が高まっている。

6. 結論

地盤条件が軟弱で、波浪条件が比較的厳しくない海域に適した軟弱地盤着底式くし形防波堤の設計法の改善のため、平成3年以降に行われてきた研究成果を検討し、より合理性の高いと思われる設計法を提案した。この設計法の妥当性を把握するために、現地において実大規模の防波堤模型の載荷実験を行った。さらに、新設計法の効果を確認するために試設計を行った。以上の検討の結果以下の結論を得た。

- 1) 杭の横抵抗のモデルとしては港研方式が適している。
- 2) 杭頭の固定度を考慮した設計法を用いることが必要である。
- 3) 堤体全体の安定性を考慮するには杭軸方向の力の釣り合いを考慮することが必要である。
- 4) 繰返し荷重による地盤反力係数の低下についての提案式の妥当性が単杭試験で実施した繰返し載荷時の挙動から把握できた。
- 5) 提案設計法によれば杭の根入れは長くなるものの、杭断面が小さくでき、堤体底版幅も短縮が図れ、建設工費縮減が可能となることがわかった。

謝辞

本研究を進めるに当たり、「軟着堤の高度化に関する

表-1 試設計結果

	従来設計法	提案設計法
堤体幅(m)	25.6	11.4
堤体延長(m)	7.5	15.0
堤体高さ(m)	9.3	8.5
杭諸元	H-522*485*35*50	H-492*465*15*20
杭根入長(m)	10.6	19.6
概算工事費	1.00	0.56

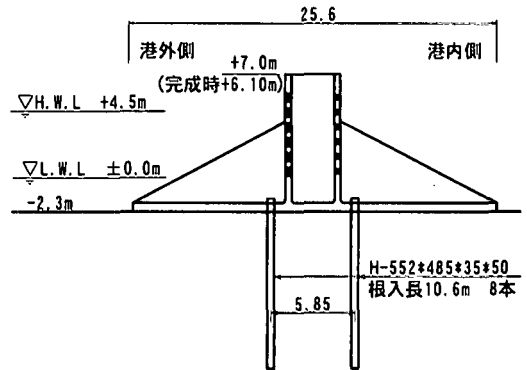


図-16 従来法による設計で決まる断面

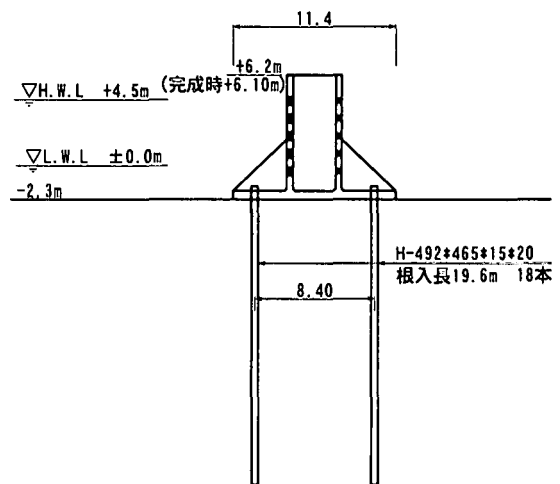


図-17 提案法による設計で決まる断面

る検討委員会」(国土交通省)の委員はじめ関係者各位には委員会を通じてご助言、ご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献:

- 1) 運輸省港湾局(1991): 軟弱地盤着堤式防波堤設計指針(案)
- 2) Broms, B. B. (1965): Design of Laterally Loaded Piles, Proc. of ACSE, Vol.91, No.SM3, pp.79-99.
- 3) 北詰昌樹ほか(1988): 正規圧密地盤上の浅い基礎の支持力, 港湾技術研究所報告第27巻第3号.
- 4) 菊池喜昭ほか(1994): 版により剛結された杭構造物の杭構造物の水平荷重に対する挙動, 港湾技研資料 No.773.
- 5) 菊池喜昭(2003): 軟弱粘性土地盤着底式くし形構造物の横抵抗特性に関する研究, 港湾空港技術研究所資料 No.1039.