

凸型曲面スリットケーソン堤の水利及び部材载荷実験

居城信男*・渡辺 清**・北沢壮介***・井福周介****

1. ま え が き

最近の港湾施設は、厳しい制約条件の下に整備せざるを得なくなっている。特に防波堤については、大水深、大波浪、軟弱地盤という自然条件での建設が多くなっている。凸型曲面スリットケーソン堤は、-25m という比較的大水深で、かつ軟弱地盤であるうえに、低反射の要請にも対処するため考案されたものである。

構造は、図-1 に示すように広幅底版を有する凸型ケーソン上部にプレストレストコンクリート構造の曲面縦スリット壁を設けたもので、その実用化のために水利実験と部材载荷実験を行なった。水利実験では、消波部一室を有するスリット堤の水利特性の検討を行ない、部材载荷実験では、従来のスリット堤と異なり消波部一室で波力を受け持つことから、消波部について構造解析による理論値と実験値との比較、各部材及び各部材の接合部の挙動・破壊状態の検討を行なった。なお、設計方法についての詳細は、第12回土木学会関東支部技術研究会¹⁾で発表しているので本文では省略する。

2. 水 理 実 験

(1) 実験条件及び実験方法

水利実験断面は、図-2 に示す (a) 防波堤、(b) 護岸について行なった。波浪条件は、 $H_{1/3}=1.25\text{m}$ (1年確率波)、 $H_{1/3}=2.5\text{m}$ (50年確率波)、 $T_{1/3}=5, 7, 11\text{sec}$ 、模型縮尺は、1:30 で、フルード相似則による歪なしの二次元水路による実験である。消波部の開口率は、前壁 (曲面スリット)=21.7%、後壁 (開口部: 長方形)=3.6%、検討項目は、反射率、波高伝達率、波圧である。

(2) 実験結果

a) 反射特性

防波堤タイプの反射率は、図-3 に示すとおり 0.3~0.5 と周期が長い程高くなるが、伝達率はほぼ 0.1 と周期による変化はあまりない。護岸タイプの反射率は、

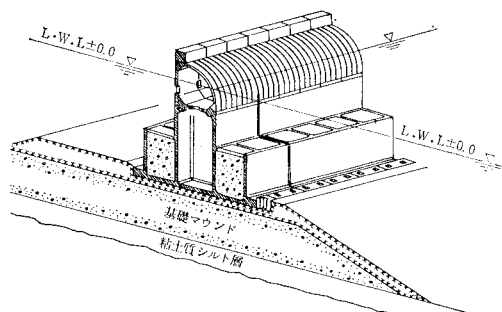
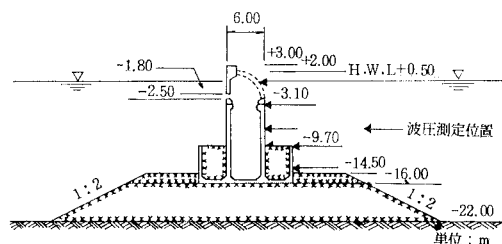


図-1 凸型曲面スリットケーソン堤



(a) 防波堤

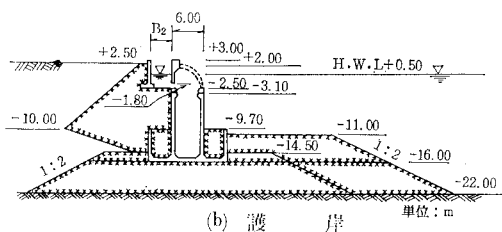


図-2 水利実験断面

0.3~0.5 と防波堤タイプと同じく周期が長い程高くなっている。

b) 波 圧

波圧は、図-4 に示すとおり合田式で $\alpha_2=0$ としたときの波圧が働くものとする算定式により計算した波圧分布と比べてもほとんど同じとみなすことができる。

(3) 考 察

本水利実験は、低反射機能、港内静穏度等の水利特性の解明のため、反射率、伝達率、波圧について行なったが大略的には、消波ブロック覆堤又は縦スリットと同

* 運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所工事専門官

** 運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所建設専門官

*** 正会員 運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所建設専門官

**** 正会員 運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所次長

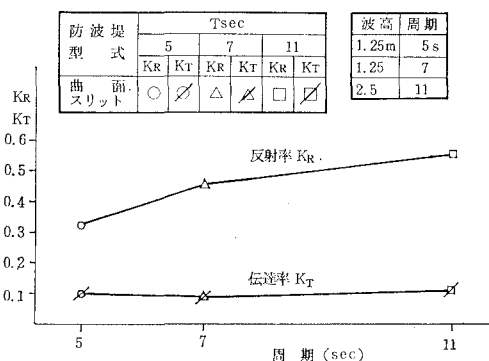
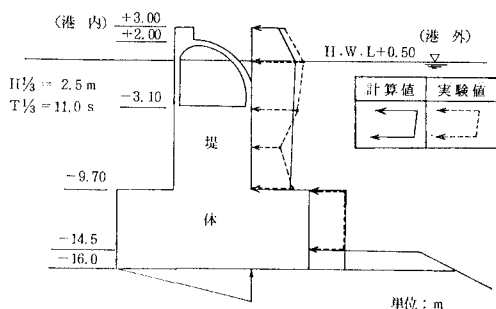
図-3 防波堤タイプの K_R と K_T の関係

図-4 波圧分布

等の機能を有していることが確認できた。

3. 部材載荷実験

(1) 実験条件及び実験方法

部材載荷実験に用いた供試体は、図-5 に示す曲面スリット消波部のスリット部材1本分に相当する幅(0.75 m/本)を取り出した縮尺 1/3 の模型で、その形状及び載荷装置を図-6 に示す。模型の曲面スリット部材はプレストレストコンクリート、底板と背面壁は一体の鉄筋

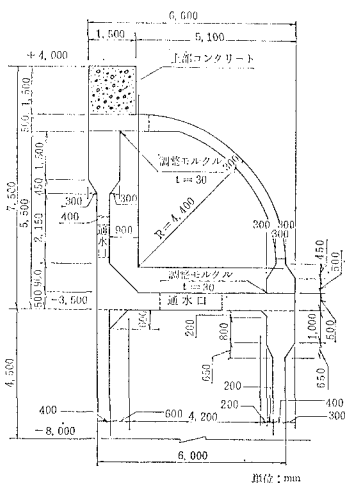


図-5 消波部標準断面

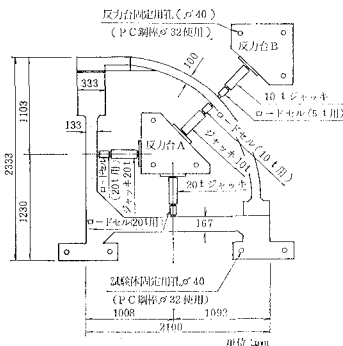


図-6 実験体の形状及び載荷装置

コンクリートであり、スリット部材はPC鋼棒により底板と背面壁に接合されている。

実験では、波圧を集中荷重におき換え 図-7 に示すスリット部材に外側から作用する波圧(I)の P_1 、スリット内側から各部材に作用する波圧(II)の $P_2 \sim P_4$ の集中荷重を載荷した。載荷の順序は、弾性内荷重レベル:

$P_1 \sim P_4$ 、ひび割れ発生荷重レベル: $P_2 \sim P_4$ をそれぞれ単独に載荷し、次に終局最大荷重レベルとして、 $P_2 \sim P_4$ を同時載荷で 1~4 回の繰返し載荷パターンで行なった。

なお、各荷重時における載荷荷重は各部材の断面耐力の割合に応じた荷重とし、それぞれの荷重段階において、変位、ひずみ、たわみ、ひび割れ幅を計測するとともに、ひび割れの進行状況と破壊状況を把握した。

又、理論値は 図-8 に示す実験体の構造モデルにより、計算にあたっては以下ことを前提としている。

- 3部材は剛結であり底板は両端固定。
- 部材は変断面部材として 20 分割要素を変位法に

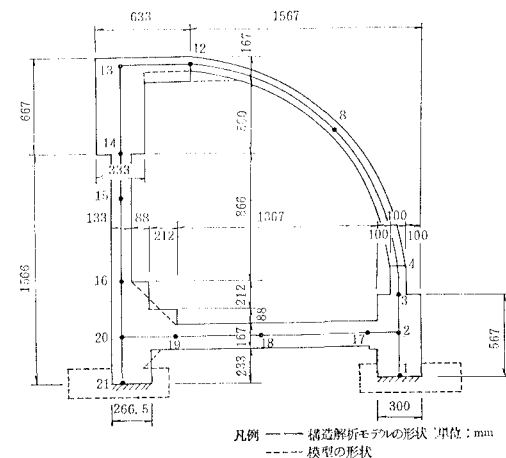


図-8 実験体の構造解析モデル

よる二次元構造モデル解析である。

c) ひび割れが生じた後も全て弾性解析としている。

d) PC接合は鉛直方向：フルプレストレス

水平方向：摩擦 $\mu=0.5$

(2) 実験結果

a) 弾性内荷重レベル

各荷重 $P_1 \sim P_4$ 載荷時の載荷点変位の理論値に対する実験値の比は、図-9に示すスリット部材に作用する P_1 載荷時で 1.00, この他の P_2 : 1.07, P_3 : 1.03 であり, 理論値と実験値はほぼ一致していた。

コンクリート及び鉄筋のひずみの理論値と実験値の差は, 10×10^{-6} 程度と誤差の範囲内である。

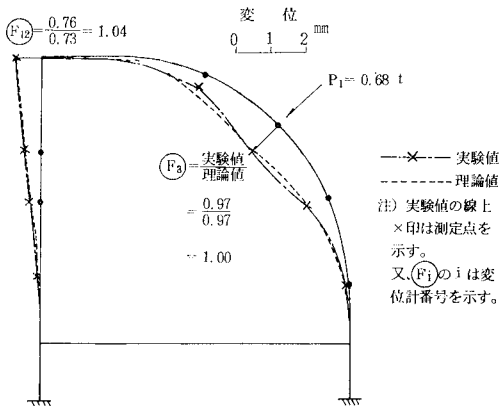


図-9 弾性内荷重レベルの P_1 荷重時の変位

b) ひび割れ発生荷重レベル

各荷重 $P_2 \sim P_4$ 載荷時の載荷点変位の理論値に対する実験値の比は, P_2 載荷時 (図-10) で 1.09, この他の荷重 P_3 : 0.95, P_4 : 1.60 と弾性内荷重レベルとはほぼ同じであった。コンクリートのひずみの差は P_2 で 10×10^{-6} , P_3 : 40×10^{-6} とほぼ同じである。鉄筋のひずみは図-11, 図-12 に示すとおり理論値との差は $10 \sim 20 \times$

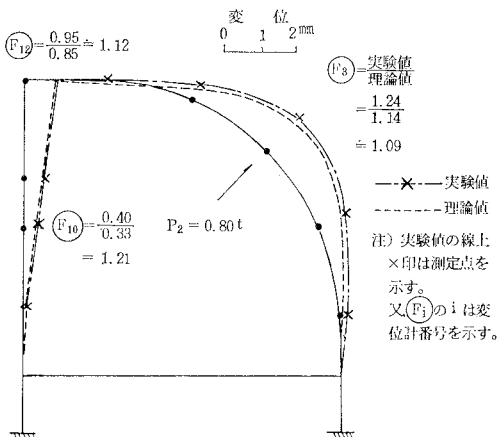


図-10 ひび割れ発生荷重レベル P_2 載荷時の変位

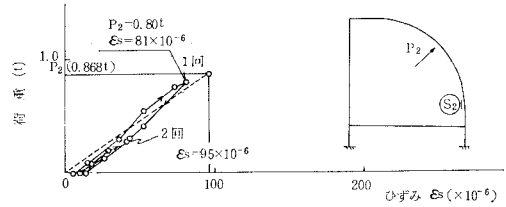


図-11 ひび割れ発生荷重 P_2 載荷時鉄筋ひずみ曲線

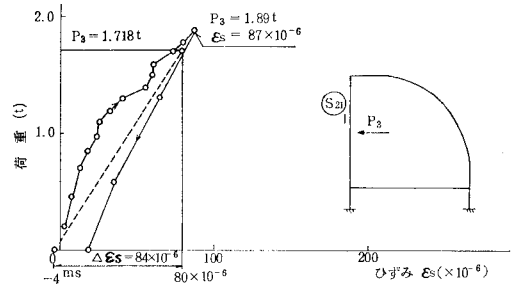


図-12 ひび割れ発生荷重 P_3 載荷時鉄筋ひずみ曲線

10^{-6} と非常に小さい。

各部材のひび割れ発生荷重の理論値と実験値の比較をまとめ 表-1~3 に示す。これから理論値と実験値はほぼ一致しているといえる。又, ひび割れ再開荷重の実験値/理論値 = $0.27 \text{ t} / 0.28 \text{ t} = 0.96$ であった。プレストレス量が理論値どおり導入されていたといえる。

表-1 スリット部材のひび割れ発生荷重

	荷 重
目視による確認値 (P_i)	0.80 t
理論値 (曲げ引張強度) (P_{k_i})	0.868 t
P_i/P_{k_i} 比	0.922

表-2 背面壁のひび割れ発生荷重

	荷 重
鉄筋ひずみからの推定値 (P_s)	1.59 t
目視による確認値 (P_i)	1.89 t
理 論 値 (P_k)	1.718 t
P_s/P_k 比	0.925
P_i/P_k 比	1.100

表-3 底板のひび割れ発生荷重

	荷 重
鉄筋ひずみからの推定値 (P_s)	2.52 t
目視による確認値 (P_i)	2.99 t
理 論 値 (P_k)	3.033 t
P_s/P_k 比	0.831
P_i/P_k 比	0.986

c) 終局最大荷重レベル

終局最大荷重レベルの載荷は, 荷重 P_2 , P_3 , P_4 を同時に各部材の断面耐力 (理論値) の割合で作用させて行き, 各部材のひび割れ幅が増加し, 引張鉄筋が降伏し, さらに各部材のいずれかが破壊して, それ以上の載荷ができなくなるまで行ない, この時の最大荷重組合せを各

々の部材の終局最大荷重と定義した。なお、設計上のひび割れ制限値 0.15mm を考慮し、0.1, 0.2, 0.3mm のひび割れ幅に対応する荷重段階ごとに解析を行なった。図-13 はスリット部材の各ひび割れ幅における変位を示したものである。

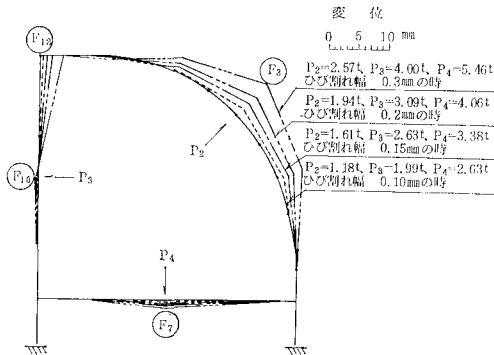


図-13 ひび割れ発生から終局に至るスリット部材の各ひび割れ幅段階の変位

荷重とひびわれ幅の関係について、実験値と理論値の比較をまとめたものを図-14、図-15に示す。図-14のスリットの0.15mmのひび割れ幅に対しこの荷重の比は、実験値 1.61t/理論値 1.80t=0.89 であり、又、実験値 1.61t に対するひび割れ幅は実験値 0.15mm、理論値 0.12mm となっている。背面壁は図-15に示す

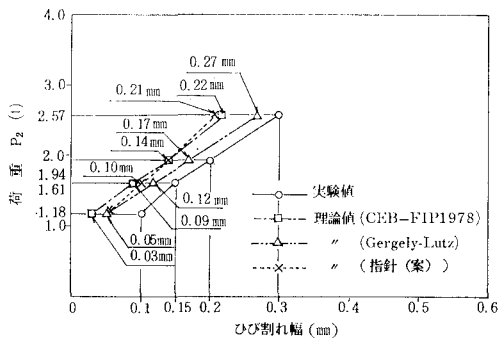


図-14 スリット部材の荷重とひび割れ幅の関係

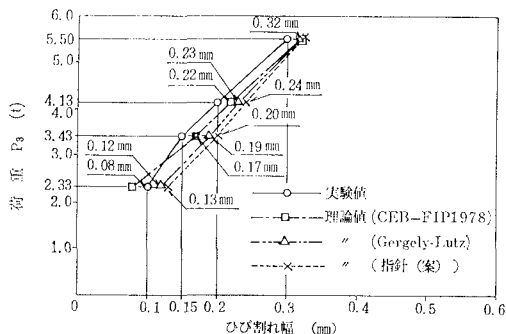


図-15 背面壁の荷重とひび割れ幅の関係

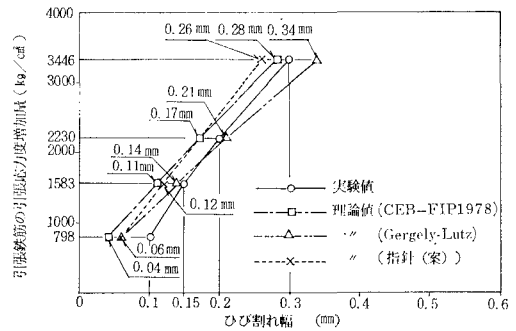


図-16 スリット部材の引張応力度とひび割れ幅の関係

とおり荷重の比は、3.43t/3.20t=1.07 となっている。

鉄筋の引張応力度とひび割れ幅の関係を示す、スリット部材について図-16に示した。

以上、ひび割れ発生荷重から終局最大荷重に至る過程の各部材の挙動、変形状況を示したが鉄筋降伏からの終局に至る各荷重時の測定値一覧を表-4に示す。これから実験値と理論値の比は、スリット部材: 1.41, 背面壁: 1.39, 底板: 1.26 であり設計値に余裕があることを示している。各部材の破壊は、スリット、背面壁の順で圧壊という挙動であったが底板はこの範囲内荷重では圧壊

表-4 鉄筋降伏から終局に至る各荷重時の測定値一覧

部材名	スリット部材	背面壁	底板	スリット部材	背面壁	底板	スリット部材	背面壁	底板
荷重	P ₂ (t)	P ₃ (t)	P ₄ (t)	P ₂ (t)	P ₃ (t)	P ₄ (t)	P ₂ (t)	P ₃ (t)	P ₄ (t)
鉄筋降伏時の荷重	2.69 (0.50)	4.66 (0.519)	5.85 (0.46)	3.68 (0.685)	6.03 (0.671)	7.99 (0.629)	5.43 (1.011)	8.30 (0.924)	11.49 (0.905)
部材圧壊時の荷重	5.43 (1.01)	8.27 (0.92)	11.41 (0.90)	5.37 (1.00)	8.98 (1.00)	12.70 (1.00)	5.37 (1.00)	8.98 (1.00)	12.70 (1.00)
実験値の終局最大荷重	1.47 (1.39)	8.98 (1.26)	12.70 (1.41)	5.37 (1.39)	8.98 (1.26)	12.70 (1.41)	5.37 (1.39)	8.98 (1.26)	12.70 (1.26)
理論値の終局最大荷重	3.80	6.455	10.016	3.80	6.455	10.016	3.80	6.455	10.016

注) 表中の()内の数値は実験値の終局最大荷重に対する割合を示す。

表中の()内の数値は終局最大荷重の実験値と理論値の割合を示す。

しなかった。又、接合部についても理論値どおり目地の開きはみられなかった。図-17はスリット部材の各荷重段階におけるひび割れ発生状況を示したものである。ひび割れ制限値の0.15mmは最初載荷点で発生している。圧壊は同じく載荷点とスリット上・下側の背面壁・底板接合部附近の断面変化個所で生じた。

(3) 考察

部材載荷実験の結果、変位及びひび割れ幅が予想以上に大きいものとなったが、これは載荷装置の制約から集中荷重条件で行なったためと考えられる。しかし実構造物は、分布幅の広い波圧であるので実験の様な厳しい挙動、状況は起らないし、接合部の開き、変位は認められず、PC部材のひび割れ幅を含めた実験値と理論値の比較でもほぼ一致をみたことから構造解析モデルの妥当性が確認できたと考えている。

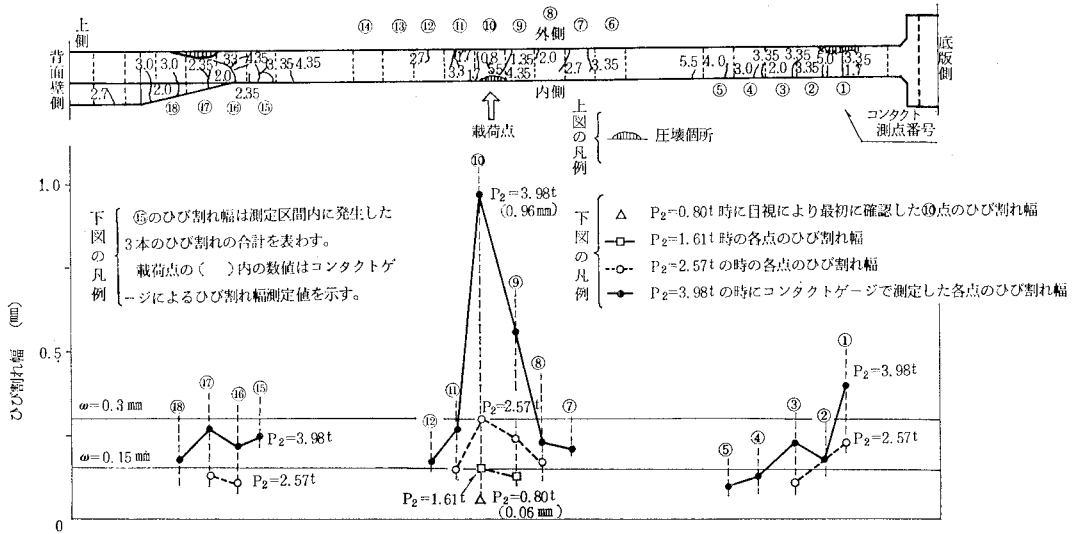


図-17 スリット部材のひび割れ幅増加状況

4. あとがき

本構造の凸型曲面スリットケーソン堤は、当初の着想段階では消波部の3部材をプレキャストとして考えたので設計・施工法ではこれらを含めた比較検討を進めて来た結果、3部材プレキャスト方式は、接合部が複雑となり工費も高くなることが明らかになりスリット部材のみプレキャストとし背面壁・底版は本体ケーソンと一体施工の構造型式が最適とされたので同構造型で試設計を行った。水利実験では、大水深であるが比較的波高が小さく、かつ軟弱地盤であることから堤体重量を軽くするための消波部一室構造について特性を把握し、他の低反射構造に比べても同等の機能を有していることを確認で

きた。部材載荷実験では、試設計で検討した構造の消波部材についてその挙動・破壊状態の理論値と実験値の比較検討を行ないほぼ一致していることを確認できた。

以上報告したように水利実験から設計・施工法の検討、部材載荷実験と5年の歳月を経てここに凸型曲面スリットケーソン堤は実用化の見通しが立った。最後に、部材載荷実験について御指導をいただいた長岡技術科学大学丸山久一助教授、運輸省港湾技術研究所清宮 理沈埋構造室長の両氏に対し感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 渡辺 清・北沢杜介・中西正則: 凸型曲面スリット防波堤の設計について, 第12回関東支部技術研究発表会講演概要集, 土木学会関東支部, pp. 37~38, 1985.