

[112] 曲面消波部材の弾塑性解析

正会員 清宮 理 (運輸省港湾技術研究所 構造部)
 正会員 ○ 横田 弘 (運輸省港湾技術研究所 構造部)

1. まえがき

水深の大きい海域に建設される海洋構造物として、強大な波力に対する安全性の確保や経済性などの理由から種々の新しい構造型式が検討されている。曲面消波構造もこれらの新しい型式の構造の一つで、波エネルギーの逸散などを目的として考案されたものである。この構造は、防波堤などの構造物の前面に取付けられ、鉄筋コンクリート (RC) あるいはプレストレストコンクリート (PC) 製の1/4円弧状の部材で構成されている。曲面消波部材には、波浪作用時に内側と外側から交互に波力が作用する。内側と外側から繰り返し外力が作用するRC及びPC曲面消波部材の強度・変形状、じん性などの基礎的な力学特性は、¹⁾ 1) 載荷実験によりほぼ明らかにすることができた。

本報告では、曲面消波部材を対象とした載荷実験及び有限要素法による弾塑性解析について述べる。また、実験結果と解析結果の比較検討により、より詳細な曲面消波部材の力学的特性を把握するとともに、有限要素法による弾塑性解析のこの種の部材への適用の妥当性について論ずる。

2. 載荷実験の概要

載荷実験に用いた供試体は、既に秋田湾に設置されている曲面消波部材の約1/3~4の模型である。供試体の形状は、**図-1**に示すように、断面図心軸半径が160cmの1/4円弧状である。両端には、固定条件を満足するため、コンクリートブロックが取付けられている。曲面消波部材の断面は、27cm (幅) × 11cm (高さ) で、引張鉄筋及び圧縮鉄筋には、D6鉄筋5本を各々使用した。使用したコンクリートは、粗骨材最大寸法が10mm、水セメント比が58%、目標強度が450 kgf/cm²のものである。載荷は、油圧ジャッキを用いて部材の中央に集中荷重を内側からもしくは外側から行った。この際、単調加力及び変位制御による繰り返し加力の2通りの方法で載荷した。測定項目は、荷重、変位、鉄筋とコンクリートのひずみ及びひびわれの性状である。

3. 実験結果の概要

本報告では、単調加力を行った場合を対象に、有限要素法による解析結果と実験結果の比較検討を行う。実験結果の概要を表**1**に示す。内側から載荷した場合と外側から載荷した場合で供試体の力学的性状は大きく異った。すなわち、鉄筋の降伏荷重及び破壊荷重は、外側から載荷した場合の方が内側から載荷した場合と比較して2倍程度大きな値を示した。しかし、変形能力は、内側から載荷した場合は、外側から載荷した場合より大きく、かつじん性率も4倍程度大きくなった。破壊の形態は、内側から載荷した場合には、載荷点付近で載荷の初期からひびわれが貫通し、その後このひびわれが拡大し、この結果供試体が2本の片持ちばりと等価な構造となり破壊に至った。また、曲面消波部材のほぼ全域でひびわ

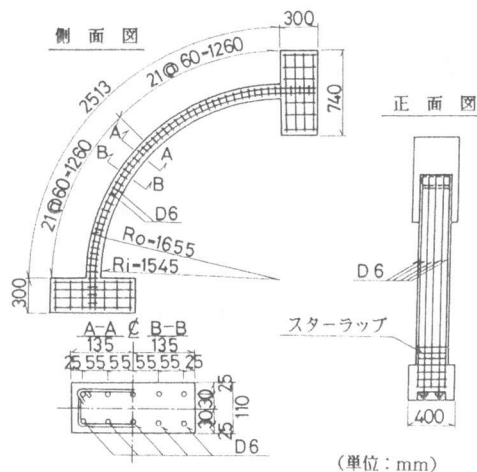


図-1 供試体の形状

表-1 実験結果の概要

No.	載荷方向	曲げひびわれ発生荷重 (tf)	鉄筋降伏荷重 (tf)	破壊荷重 (tf)	破壊の形態
1	内側→外側	1.0	3.0	6.3	コンクリートの圧縮破壊、鉄筋の破断
2	外側→内側	2.0	6.2	13.0	コンクリートの圧縮せん断破壊

れが発生した。一方、外側から荷重した場合には、荷重点及び荷重点と端部のほぼ中間点でひびわれが集中的に発生した。破壊の形態は、荷重点付近でのコンクリートのせん断破壊、荷重点及び中間点でのコンクリートの圧縮破壊であった。

4. 有限要素法 (FEM) による解析方法の概要²⁾

今回の FEM による解析では、RC 実験供試体の荷重断面を対称軸に上半分を計算の対象とした。要素分割を図-2に示す。端部は、計算上は完全固定としたが、実験に際して固定の条件は、ほぼ満足することが確認されている。FEM による解析では、対称条件を考慮して荷重断面の節点の境界条件が与えられる。しかし、実験結果では、対称軸である荷重断面に顕著なひびわれが発生し、ひびわれ貫通後には、荷重断面がヒンジ状態となり、あたかも2つの部材に分離したような挙動となった。このため、対称条件を考える場合、荷重断面の節点で X 方向に変位自由、Y 方向に変位固定とするのが普通であるが、今回は、図-3に示すようなモデルとした。すなわち、図中で X 方向の変位は自由とし、Y 方向では、コンクリート要素の引張側のバネ剛性を0、圧縮側のバネ剛性を固定条件を満足するような値に設定した。ただし、鉄筋を構成する節点には、実験での破壊の状況を考慮して、通常対称条件を付与した。コンクリート及び鉄筋には、4節点のアイソパラメトリック要素を用いた。コンクリートの1軸状態での応力-ひずみ関係を図-4に示すものと仮定し、鉄筋の応力-ひずみ関係は、バイ・リニアに設定した。コンクリートの多軸状態での応力-ひずみ関係は、主応力から定義した相当応力と主ひずみから定義した相当ひずみの関係が図-4に示す関係になると仮定した。コンクリートの降伏及び破壊曲面は、図-5に示すものを用いた。鉄筋の降伏条件は、von Misesの式を用いた。ひびわれは、Smearred Crack モデルを用いて表現し、ひびわれ発生後は、ひびわれ直交方向の要素の剛性を0とした。またこの際、せん断剛性は、 $0.5 G_s$ (G_s : せん断弾性係数) の形で低減した。コンクリートと鉄筋間の付着は、ボンド・リンク要素で表現した。付着応力-相対変位の関係は、バイ・リニア型とし、最大付着応力は、 25 kgf/cm^2 に設定した。また、外側からの荷重の場合には、完全付着としたモデル化も行い、付着-すべり現象のモデル化が計算結果に及ぼす影響を検討した。各材料の力学定数を表-2に示す。せん断補強筋(スターラップ)は、コンクリートの弾性係数に換算した。

5. 解析結果

荷重点での荷重-変位関係を図-6に示す。内側からの荷重の場合、破壊近傍までは、解析結果と実験結果はよく一致している。FEMによる解析でのひびわれ発生荷重、鉄筋降伏荷重及び破壊荷重(コンクリートの圧縮破壊)は、それぞれ 1.6 tf 、 3.2 tf 及び 7.0 tf であり、実験結果での各々の荷重とほぼ同じである。しかし、外側からの荷重の場合、解析結果と実験結果とはよく一致していない。特に、鉄筋降伏荷重に関して、解析値は実験値と比較して2倍程度大きな値となっている。解析での鉄筋の降伏に至る荷重が大きいため解析結果と実験結果の差を生じさせた原因の1つであると考えられ、その理由を以下で検討する。

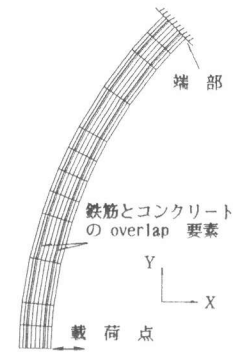


図-2 FEM要素分割図

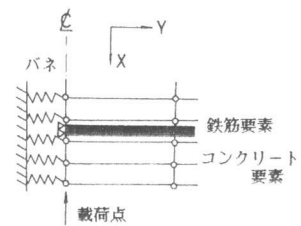


図-3 荷重断面のモデル化

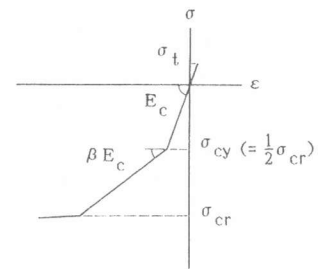


図-4 コンクリートの応力-ひずみ関係

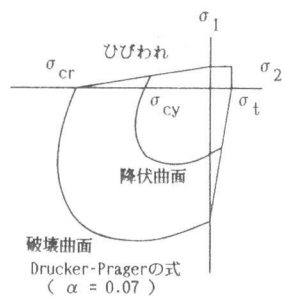


図-5 コンクリートの破壊曲面

表-2 材料の力学定数 (kgf/cm²)

荷重方向	コンクリート					鉄筋	
	圧縮強度 σ_{cr}	引張強度 σ_t	弾性係数 E_c	係数 β	ポアソン比	降伏強度	弾性係数
内側→外側	508	25	2.8×10^5	0.41	1/6	3720	2.1×10^6
外側→内側	472	25	2.7×10^5	0.41	1/6	3720	2.1×10^6

荷重と荷重点付近での鉄筋のひずみ量との関係を図-7に示す。内側からの荷重の場合、FEMによる解析結果と実験結果はよく一致しており、本解析での鉄筋のモデル化及び鉄筋とコンクリート間の付着のモデル化が比較的妥当なものであったと言える。外側からの荷重の場合、同一荷重に対して、解析で得られた鉄筋のひずみ量は、実験結果よりも小さい。また、鉄筋とコンクリートが

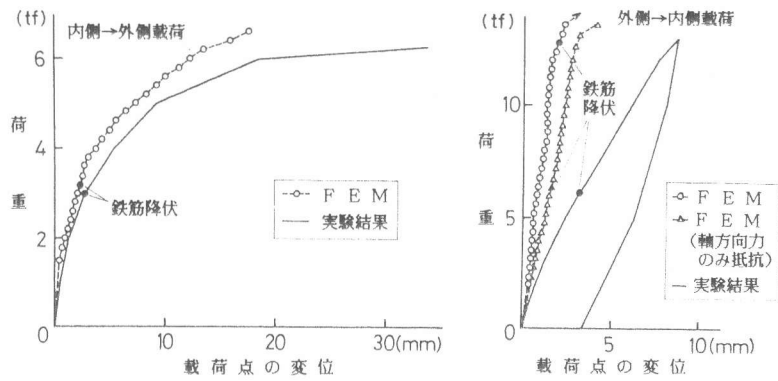


図-6 荷重-変位関係

完全付着であるとしたモデル化では、鉄筋のひずみ量は、若干大きくなっている。供試体の軸方向の鉄筋のひずみ量の分布を図-8に示す。内側からの荷重では、解析結果と実験結果がよく一致している。外側からの荷重では、荷重点付近の鉄筋のひずみ量は、解析結果の方が実験結果よりも小さいが、端部及び中間点付近では、両者はほぼ一致している。したがって、外側からの荷重の場合、荷重点に近づくにつれて、解析結果と実験結果の差が大きくなってきていると言える。

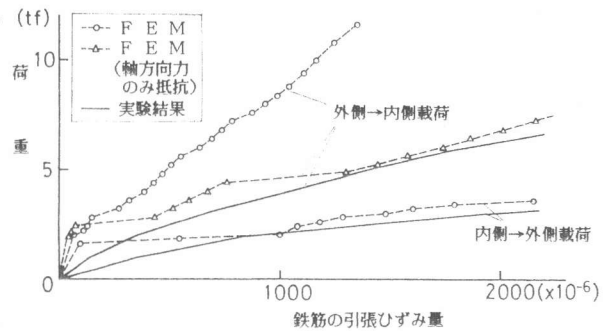


図-7 荷重-鉄筋ひずみ関係

これらの原因として、外側からの荷重では、かなり大きな半径方向の圧縮応力が計算されることがあげられる。すなわち、通常の平面応力モデルでは、鉄筋が半径方向の応力にかなり抵抗して、その結果部材のみかけ上の剛性が高くなる。鉄筋が半径方向に抵抗せず軸方向のみに抵抗するモデルでは、図-6に示すように、鉄筋降伏荷重が6.2 tf、破壊荷重が13.6 tfと計算され実験結果とほぼ一致した。また、図-7に示す鉄筋のひずみ量もほぼ解析結果と実験結果が一致した。しかし、解析結果での変形は、同一荷重で半径方向に抵抗するモデルと抵抗しないモデルで大差がなく、実験結果と差がある。したがって、変形性状を精度良く推定するためには、次のような点にも考慮する必要があると考えられる。すなわち、本解析の対象とした曲面部材は、両端固定のアーチと等価であり、外側からの荷重では、部材の変形が大きくなるに従い、中央断面及び端部との中間点に塑性ヒンジが形成される。塑性ヒンジの形成で、部材は回転し、変形も大きくなる。変形がある断面にかなり集中するような場合には、この現象をモデルに適切に取り入れなければならないと考えられる。今回の解析では、このモデル化までには至っていない。

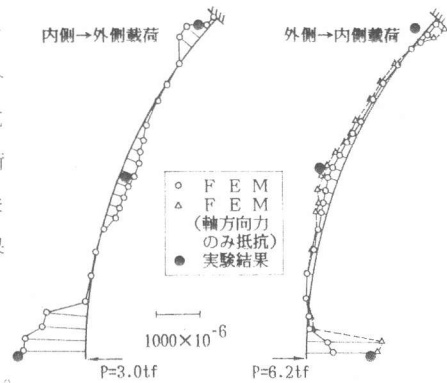


図-8 鉄筋ひずみの分布

FEM解析で得られた主応力線図を図-9に示す。内側からの荷重では、荷重点付近と中間点付近に大きな主応力が計算されている。円周方向の圧縮応力は、荷重断面内でほぼ一様となっているが、中間点付近では、外縁部のみに計算される。また、半径方向の応力は小さい。外側からの荷重では、前述のように、半径方向の圧縮応力が荷重断面及び中間

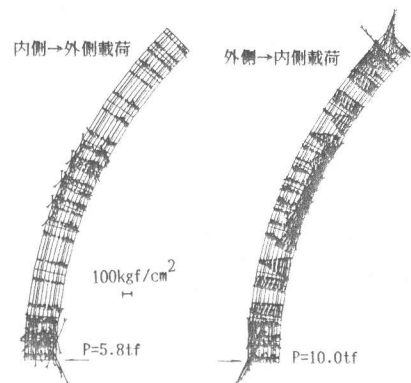


図-9 主応力線図

点の内縁付近でかなり大きく算定される。

FEM解析及び実験で得られたひびわれ発生 の状況を 図-10 に示す。解析では、Smearred Crackモデルを採用しているため、正確にひびわれの進展状況を追跡することは難しいが、ひびわれの発生する領域を把握できる。解析では、内側からの荷重の場合、ひびわれ発生時には、荷重点付近のみにひびわれの発生がみられるが、その後すぐに端部及び中間点付近でひびわれの発生がある。さらに破壊に至るまでに、他の部分でもひびわれの発生・進展が見られ、破壊時には、部材の全ての個所にひびわれが発生する。また、破壊は、荷重点付近でのコンクリートの圧縮破壊である。以上の結果は、実験結果とよく一致しており、破壊の形態も合致している。外側からの荷重の場合、ひびわれの発生は荷重点近傍で見られ、その後しばらくの間、この部分のみでひびわれが進展する。破壊時に近くなると、端部及び中間点付近でもひびわれが発生し、比較的急速に進展する。また、破壊は、荷重点及び中間付近の断面でのコンクリートの圧縮破壊であり、部材では、3点で塑性ヒンジが発生していると考えられる。以上の結果は、実験結果を良く説明している。また、外側からの荷重の場合、実験で

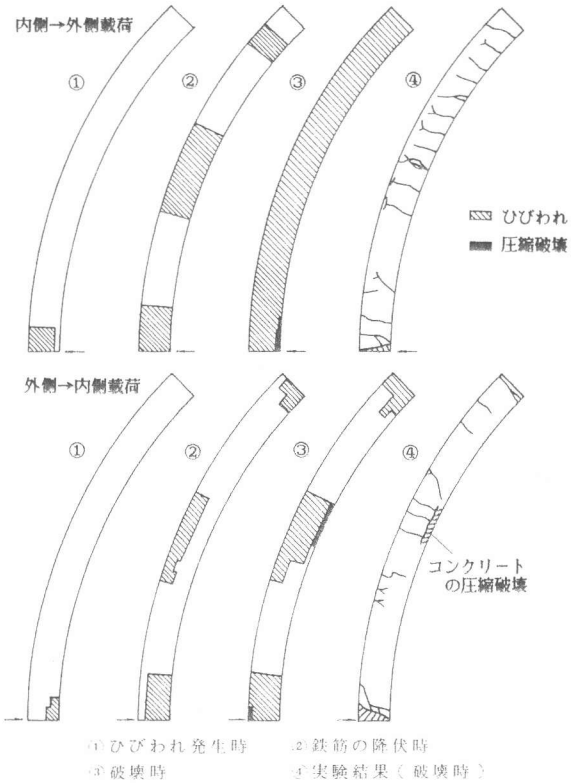


図-10 ひびわれ発生の様子

は、荷重点付近でせん断ひびわれが観察された。解析結果では、せん断ひびわれと曲げひびわれの分離は難しいが、この部分でかなり大きなせん断力が計算されており、せん断破壊の生じる可能性を推測することができる。

6. 曲面消波部材の構造力学的特性

曲面消波部材のように曲率を有する部材では、断面内のひずみ分布が曲率の影響で双曲線分布となるものとした補正が行われている。³⁾ 今回の検討の対象である部材は、半径に比べて断面の高さが小さく、直線部材と仮定して得られた断面耐力とほぼ同じである。しかし、荷重の方向により、実験でも解析でも、強度・変形状、ひびわれの性状、破壊の形態等が大きく異なることが判明した。特に外側からの荷重では、解析で得られたように断面内にかかなりの圧縮力が生じ、コンクリートの応力・ひずみの関係、鉄筋とコンクリート間の付着の性状などは、従来の直線部材と異なるものと考えられる。

7. まとめ

曲面消波部材の荷重実験とFEMによる弾塑性解析により、以下の主要な結論が得られた。

① 内側からの荷重では、荷重点付近でひびわれが貫通後、構造系が2本の片持ばりと等価なものへと移行する。この現象をFEMによる解析でもかなり精度良く追跡できる。

② 外側からの荷重では、実験結果と解析結果が良い一致を示さなかった。この原因として、かなり大きな半径方向の応力が計算され、鉄筋の応力分担、付着一すべりの挙動等が直線部材と異なることが考えられる。また、塑性ヒンジでの回転能力を計算モデルに適切に組込むことが重要であると考えられる。

8. あとがき

荷重実験では、RC部材のみならずPC部材も対象に繰り返し荷重を実施しており、今回検討したモデル化の手法を整理してさらに解析を進める予定である。

参考文献 1) 清宮、横田、西澤：曲面形状をした消波部材の力学的性状、第5回コンクリート工学年次講演会講演論文集、1983年
 2) 横田、清宮：鉄筋コンクリート部材の有限要素法による非線形解析、港湾技研資料No.460、1983年9月
 3) 川上、加賀谷、徳田：鉄筋コンクリート曲線部材の塑性設計、コンクリート工学論文80-5.2、コンクリート工学Vol.18、No.5、1980年5月