

# 多孔を有する PC 円筒波浪制御構造物の耐荷力に関する実験的検討

清 宮 理\*  
 森 下 吾\*\*  
 古 賀 尚 宏\*\*\*  
 岡 島 武 博†

## 1. まえがき

波浪制御構造物は、海岸より離れた地点に線状に配置し、外海からの波浪の侵入を制御して沿岸域に広大な静穏海域を創成する目的で建設される。大水深海域で採用可能な波浪制御構造物の一つに図-1に示す二重円筒ケーソン<sup>1)</sup>がある。二重円筒ケーソンは鉄筋コンクリート製あるいはプレストレストコンクリート製の外側円筒壁、内側円筒壁、底版、中間床版等の部材で構成される。外側円筒壁の外海側には多数の長方形の開口を設けてある。開口面積は外海側前面の円筒壁の面積の10~20%である。開口を通った波は、外側円筒壁と内側円筒壁間の遊水部でエネルギーを消費する。沿岸域に設置される二重円筒ケーソンの主たる外力は図-2に示す波浪、船舶の衝突等である。二重円筒ケーソンの構造設計は、これらの外力を用いて有限要素法(弾性解)により断面力(曲げモーメント、せん断力および軸力)を計算し、この断面力に耐えるように部材の諸元を設定する手順で行われる。円筒壁では、面外力と面内力<sup>2)</sup>の両者が重要な断面力となる。構造様式や外力の設定およびPC部材の面内力に関する設計法については、本雑誌の第31巻第2号に報告<sup>3)</sup>済みである。

しかし、構造設計を行ううえで多数の開口部の存在が円筒壁全体の強度にどのような影響を及ぼすかは十分把握されておらず構造設計時に問題点となっている。そこで今回、模型載荷実験によって、外側からの集中荷重と内側からの分布荷重を受けた場合の円筒壁の強度、ひびわれ性状等の力学的性状を把握し、今回の構造設計法が妥当であるか、また開口部の補強法が有効であるか調べる。本報告では、特に円筒壁を対象とした載荷実験の結果を中心に述べる。

\* Osamu KIYOMIYA : 運輸省港湾技術研究所構造部

\*\* Syogo MORISHITA : オリエンタルコンクリート(株)技術部

\*\*\* Hisahiro KOGA : ピー・エス・コンクリート(株)技術部

† Takehiro OKAJIMA : ドーピー建設工業(株)技術部

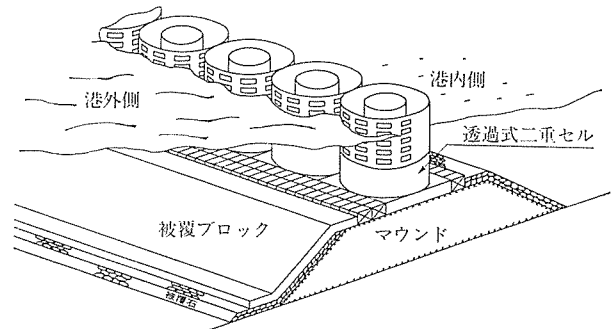


図-1 二重円筒ケーソンの概要

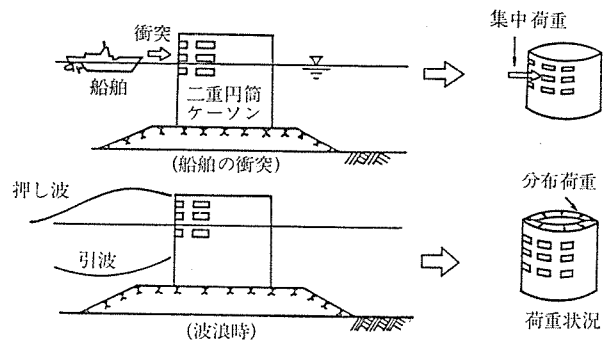


図-2 二重円筒ケーソンに作用する外力

## 2. 円筒壁の耐荷力

### 2.1 押抜きせん断力

二重円筒ケーソンが船舶の往來の激しい地点、流木の流失の可能性のある地点に建設される場合には、これらの衝突に対する安全性の検討<sup>4)</sup>が必要である。船舶、流木等の衝突では、円筒壁の一点に集中的な荷重が水平方向に作用する。船舶、流木の速度が速くない場合、静的な荷重として衝突荷重を考えた方が良い。PC製の円筒壁でこの衝突による集中荷重に対して押抜きせん断力の耐荷力を検討する。押抜きせん断力の耐荷力は次式により求まる。

$$V_{pcd} = f_{pcd} \cdot u_p \cdot d / r_b \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $f_{pcd} = 0.6 \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_r \cdot \sqrt{f_{cd}}$

$$\beta_d = \sqrt[4]{100/d}, \quad \beta_p = \sqrt[3]{100/p}$$

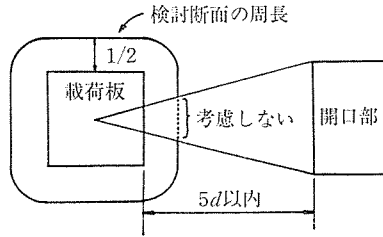


図-3 検討断面

- $\beta_r = 1 + 1 / (1 + 0.25 u / d)$
- $f_{cd}' = \text{コンクリートの圧縮強度 (kgf/cm}^2\text{)}$
- $u = \text{載荷面の周長 (cm)}$
- $d = \text{有効高さ (cm)}$
- $u_p = \text{検討断面の周長 (cm) (図-3 参照)}$
- $p = \text{鋼材比}$
- $r_b = \text{部材係数}$

載荷板付近に開口部が存在するときは押抜きせん断力が低下すると考えられるが、検討断面の周長 ( $u_p$ ) の設定でこの影響を考慮する。具体的には、 $5d$  の範囲内の  $u_p$  で開口部の占める範囲を差し引く。この考え方は、参考文献 5)、6) に示されているものである。

## 2.2 曲げ耐力

円筒壁には 2.1 に述べた集中荷重、あるいは波力、土圧力の分布荷重によって面内力 (軸力) と面外力 (曲げ、せん断) の両者が生ずるので、曲げ耐力の算定では軸力の考慮が不可欠となる。円筒壁では外側からの波力に対しては部材内に圧縮力が生ずるので PC 部材としてはかなりの耐荷力があるが、内側からの土圧、水圧に対しては部材内に引張力が生ずるので耐荷力は小さい。曲げと軸力の両者を受ける PC 部材の曲げ耐力 ( $M_u$ ) と軸耐荷力 ( $N_u'$ ) は次式を基に算定できる。

$$N_u' = C' + T_{sc}' - T_{st} + T_p$$

$$M_u = C'(h/2 - 0.4x) + T_{sc}'(h/2 - d_c) + (d - h/2)T_{st} + T_p(d_p - h/2) \dots\dots(2)$$

- ここで、  $C'$  : コンクリートの軸力
- $T_{sc}'$  : 圧縮側の鉄筋の力
- $T_{st}$  : 引張側の鉄筋の力
- $T_p$  : PC 鋼棒の力
- $h$  : 壁厚
- $d_c$  : コンクリートの圧縮縁から圧縮鉄筋までの距離
- $d$  : 有効高さ
- $d_p$  : コンクリートの圧縮縁から PC 鋼棒までの距離
- $x$  : 中立軸からコンクリートの圧縮縁までの距離

上式で  $x$  を設定して所定の耐荷力を求める。この曲げ

耐荷力を計算するためには、部材各点での曲げモーメントと軸力を計算しなければならない。この値は円筒壁を対象にシェル要素を用いた 3 次元の有限要素法によって求める。

## 2.3 ひびわれ幅

海洋環境下に置かれた PC 部材では、材料の耐久性の観点からひびわれの発生あるいはひびわれ幅を制限する。ひびわれの発生を制限する場合には、コンクリート部材の引張応力が引張強度以内になるようプレストレスを導入する。ひびわれ幅の計算式としてはプレストレスの存在と純引張の影響を考慮できる、CEB-FIP の式 (1978 年) を用いる。

$$\text{最大ひびわれ幅 } W_k = 1.7 \times W_m$$

$$\text{平均ひびわれ幅 } W_m = S_{rm} \times \varepsilon_{sm}$$

ここで、  $S_{rm}$  : ひびわれ間隔

$\varepsilon_{sm}$  : 鋼材のひずみ量

ひびわれ幅の制限値は  $0.0035 C$  cm ( $C$  : かぶり, cm) である。一般的には、海洋環境下では材料の耐久性の観点から  $0.15 \sim 0.2$  mm 以内に制限するのが良いとされている。

## 3. 載荷試験

### 3.1 試験体の構造

載荷実験の対象とした試験体は 2 体である。試験体の構造を図-4 に示す。試験体の大きさは高さ 2.0 m、直径 2.0 m、円筒壁の板厚 0.13 m で、多孔を有する円筒部材と正方形の底版より構成される。この試験体は、二

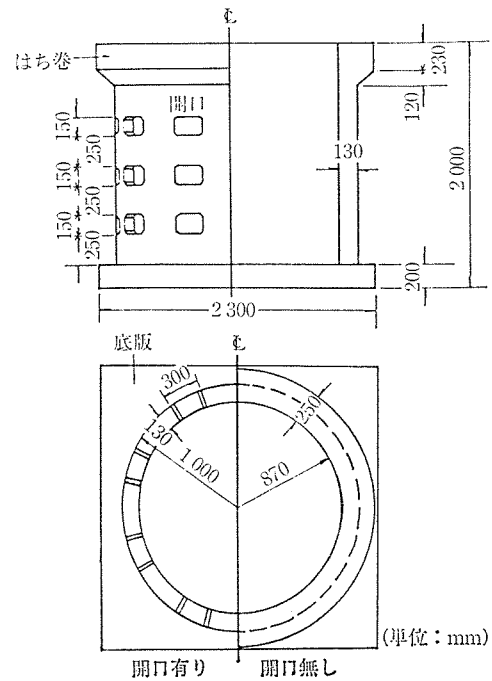


図-4 試験体の概要

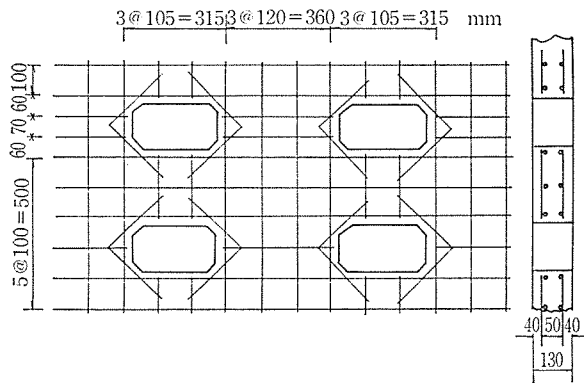


図-5 開口部での配筋

表-1 鋼材の強度

	直径 (mm)	規格	降伏点 (kgf/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (kgf/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	弾性係数 (kgf/mm <sup>2</sup> )
鉄筋	10	SD 30 A	36.5	52.2	27.6	—
PC 鋼棒	9.2	SBPR 95/110	116	118	12	20 500

表-2 コンクリートの配合条件

スランプ (cm)	空気量 (%)	水・セメント比 (%)	細骨材率 (%)	最大骨材寸法 (mm)
8±2.5	5±1	58	51	13

重の円筒でなく一重の円筒に簡略化してあり、寸法的には、実物の約 1/10 である。円筒部材の前面には、幅 30 cm、高さ 15 cm の開口部が 12 箇所設けてあり、後面には設けていない。開口の四隅には一辺 3 cm のハンチを設けてある。試験体の開口部付近の配筋状況を 図-5 に示す。開口部の四隅には長さ 25 cm の D6 の鉄筋を各々 2 本ずつ配して補強を行う。PC 鋼棒は直径 9.2 mm のを円筒部の円周方向と鉛直方向および床版に配筋する。また、円筒の頭部には現地での状況を考え、針巻き状に補強を施す。使用した鉄筋の材質は SD 30 A、PC 鋼棒の材質は SBPR 95/110 であり、表-1 のこれら鋼材の試験結果を示す。表-2 にコンクリートの示方配合を示す。用いたセメントは普通ポルトランドセメントであり、スランプ 3 cm、空気量が 5% を目標とした。配合強度 ( $\sigma_c$ ) は 330 kgf/cm<sup>2</sup> である。

### 3.2 プレストレスの導入

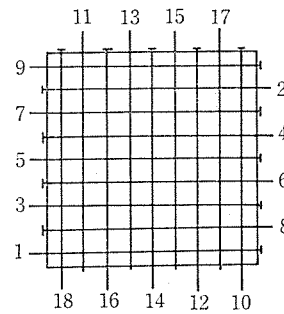
試験体では、コンクリート応力で 10 kgf/cm<sup>2</sup> の PC 量を導入する。プレストレスの導入は、図-6 に示すように底版、円筒の鉛直方向、円筒の円周方向の順で行う。この順序は現地での施工状況を考えたものである。試験体に二次応力によるひびわれを与えぬようプレストレ

ス導入用ジャッキの操作を行う。図-7 にプレストレス導入段階ごとの円筒壁基部でのコンクリートのひずみ分布を示す。導入段階で基部へのひびわれの発生の恐れのある引張ひずみは発生しておらず、予定どおりのプレストレス量を試験体の円筒壁に導入できた。

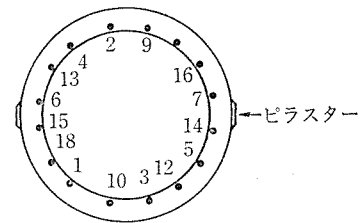
### 3.3 載荷方法

載荷の方法は集中荷重と等分布荷重の 2 種類である。

(1) 底版



(2) 円筒壁鉛直方向



(3) 円筒壁円周方向

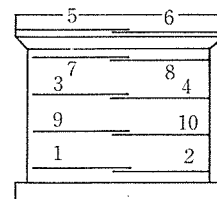


図-6 PC の導入手順

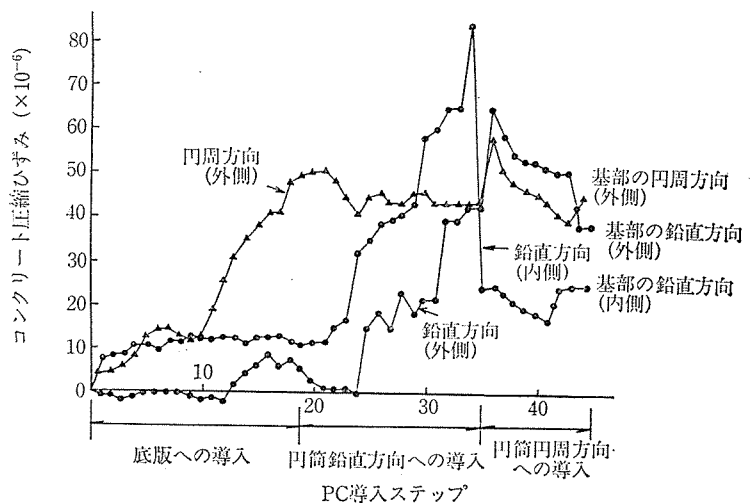
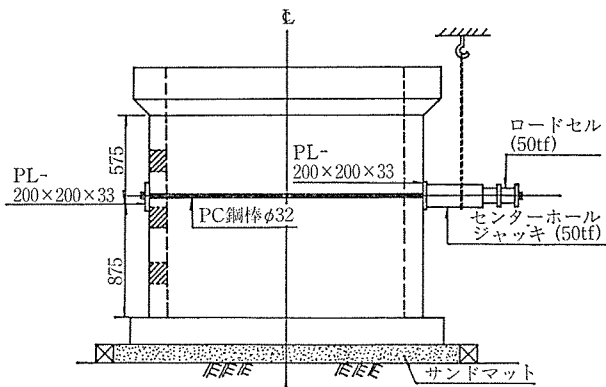
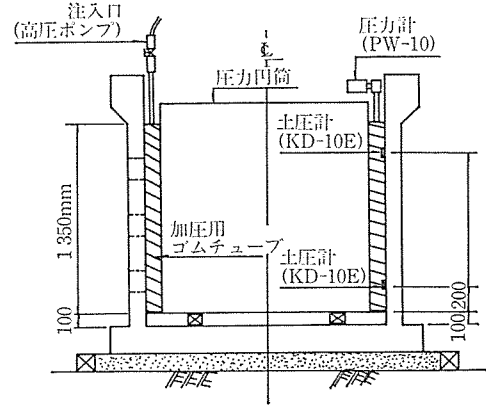


図-7 PC 導入時のひずみの変化

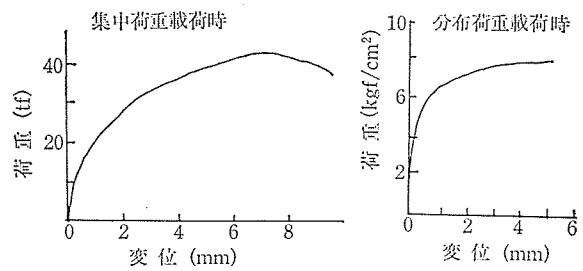


図—8 集中荷重の載荷方法



図—9 分布荷重の載荷方法

集中荷重では図—8に示すようにφ32のPC鋼棒を円筒の下端より87.5cmの高さに水平方向において、センターホールジャッキ(容量50tf)によって載荷を行う。載荷板は一辺20cm、厚さ33mmの正方形の鉄板を用いる。等分布荷重では、図—9に示すように円筒部材の内側にゴム製の袋(容量75tf/m<sup>2</sup>)を設置し、水圧によって載荷を行う。載荷は、ひびわれ発生荷重、鉄筋降伏荷重、破壊荷重の各荷重に達するまで荷重を増加させ、そのつど除荷を行う。



図—10 荷重～変位曲線

### 3.4 計測項目

計測項目は以下のとおりである。

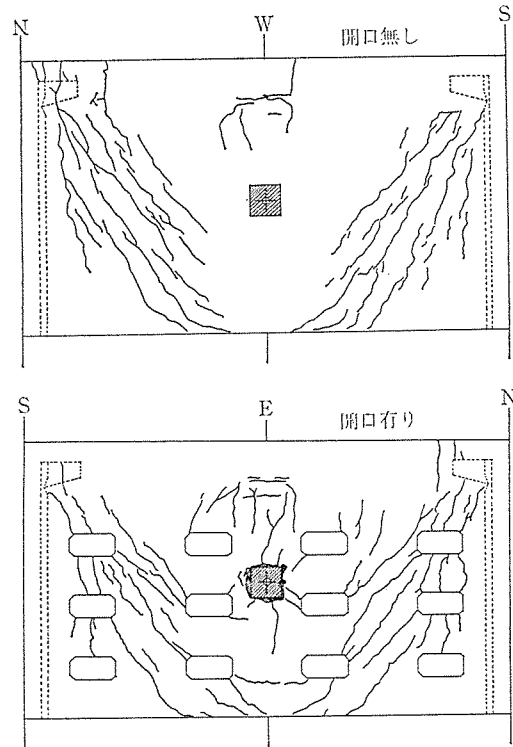
- 荷重：集中荷重……ロードセル1台
- 分布荷重……水圧計3台
- 試験体の変形：大变位計2台
- 小型変位計15台
- 鋼材のひずみ：ひずみゲージ70点
- コンクリートのひずみ：ひずみゲージ8点
- ひびわれ幅：二軸亀裂計4点
- カンチレバー型変位計6点
- π型ゲージ49点

ここに、カンチレバー型変位計は円筒部材内側の底版と円筒壁との境に、二軸亀裂計は初期ひびわれ発生箇所に取り付ける。

## 4. 試験結果と考察

### 4.1 破壊状況

載荷実験の結果を表—3に示す。表中には計算結果も併記してあるが、このことは後述する。図—10(a)、(b)に荷重～変位曲線を示す。この場合の変位は、載荷点位置に取り付けてある変位計で取得されたものである。図—11にNo.1試験体でのひびわれ発生状況と破壊状況を示す。初期ひびわれは円筒の内側の載荷点に発生した。内側については載荷点を中心に主に上下方向へ放射状にひびわれが進展した。主なひびわれの本数は数本で



図—11 集中荷重によるひびわれ

表—3 計算値と実験値との比較

試験体	ひびわれ荷重		鋼材降伏荷重		最大荷重 実験値
	計算値	実験値	計算値	実験値	
No.1 集中荷重	9.8 tf	13.0 tf	36.8 tf	38.0 tf	42.2 tf
No.2 分布荷重	37.1 tf/m <sup>2</sup>	44.3 tf/m <sup>2</sup>	49.2 tf/m <sup>2</sup>	56.8 tf/m <sup>2</sup>	79.5 tf/m <sup>2</sup>

ある。円筒外側では載荷点を離れて図に示すようにV字形にひびわれが進展した。ひびわれの本数は数本で、ほぼ等間隔に発生しており平均的なひびわれ間隔は 10 cm ぐらいである。これらのひびわれは、曲げによるものと考えられる。

開口部のある側とない側とで、ひびわれの性状は特に大きく変わらない。また開口部の四隅から必ずしもひびわれの発生が顕著でなかった。最終的には、開口部の載荷点での押抜きせん断で終局に至った。押抜きせん断の円筒内側でのひびわれは、図中で線の太さを強調して示してあるが開口部を横切っていた。図-12 に No. 2 試験体でのひびわれ発生状況を示す。初期ひびわれは、円筒の外側の開口部側に上下方向に生じた。載荷荷重が増加するにしたがって上下方向ひびわれ本数が増加しはじめ、15~30 cm 間隔にひびわれが生じた。また円筒部の中央に水平方向にもひびわれが生じた。このひびわれ性状は、開口部のある側とない側とで特に大きく変わらない。また開口部の四隅からひびわれが発生しはじめるとは限らなかった。また上下方向のひびわれはほぼ部材を貫通して生じており、円周方向の軸引張力により生じたものと考えられる。また水平方向のひびわれは鉛直方向の曲げによると考えられる。等分布荷重による載荷では、ひびわれ幅が増加し、鋼材が降伏して終局に至った。

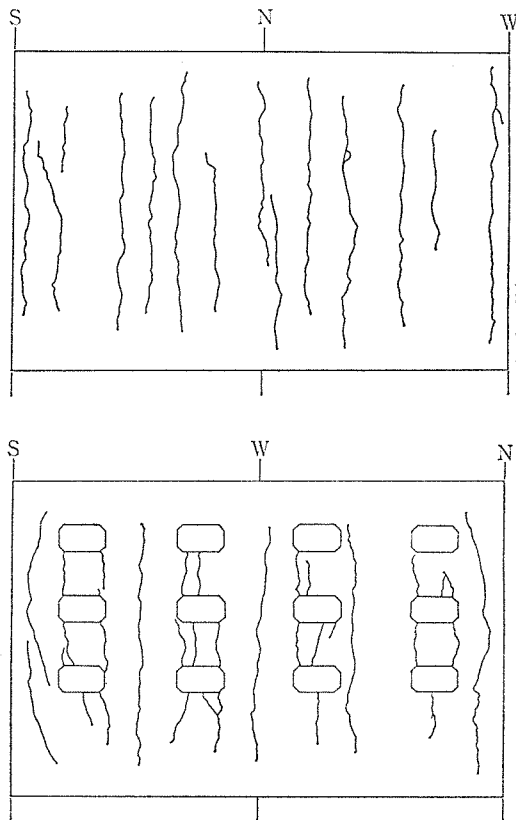


図-12 分布荷重によるひびわれ

#### 4.2 鉄筋のひずみ

図-13 に No. 1 試験体での載荷点高さでの円周方向のひずみ分布を示す。ここで図中の外側は円筒壁の外側の鉄筋に、内側は内側の鉄筋に各々取り付けられたひずみゲージで得られた値である。集中荷重を受ける場合、円周

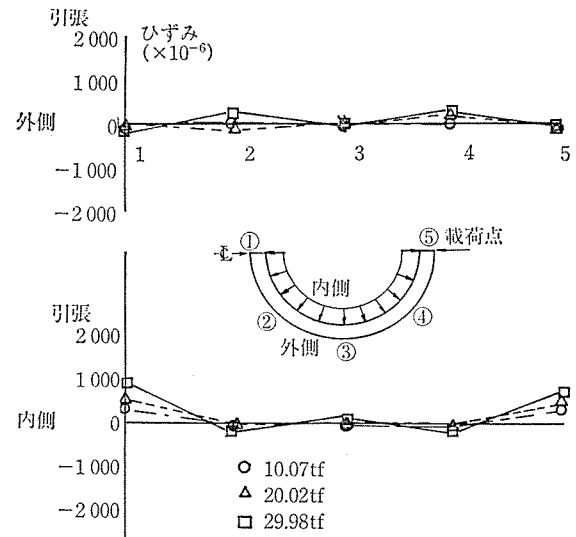


図-13

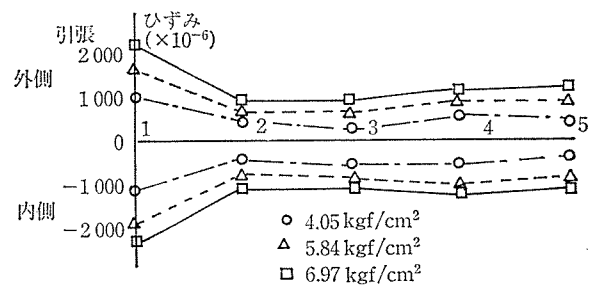


図-14

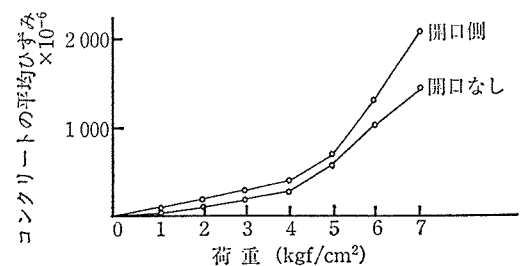
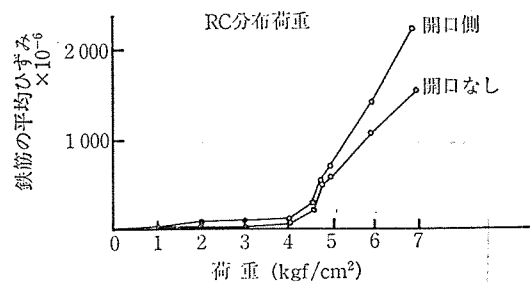


図-15 荷重とひずみとの関係

◇論文報告◇

方向の鉄筋のひずみは、載荷点付近で大きな値となるが少し離れると値は非常に小さくなる。

この試験体では載荷点付近で曲げひずみが卓越していることがわかる。図-14 に No. 2 試験体での円周方向のひずみ分布を示す。円周方向にはほぼ様なひずみが生じており、かつ内側と外側でひずみ量が同程度であることから軸引張力が卓越していた。図-15 に開口部側と開口部がない側での、RC 試験体<sup>7)</sup>での鉄筋とコンクリートの平均ひずみと載荷荷重との関係を示す。PC 試験体では計測されなかったため、RC 試験体での結果を紹介する。鉄筋のひずみは円周方向鉄筋に貼った鉄筋ひずみでの平均値である。またコンクリートひずみは 37 個のパイゲージを円周方向に一列並べて計測した値の平均値である。

この図からもわかるように、開口部側の方が開口部のない側よりも若干鉄筋とコンクリートのひずみが大きい、ほぼ同一と考えても良さそうである。今回の開口部での補強を行えば、破壊状況および、鉄筋のひずみ量に関して開口部の有無による差は大きくないと言える。

このことは、構造設計において二重円筒ケーソンの断面力を概略検討する場合、開口部がないとして一枚の壁で計算モデルを作成しても良いことを示している。このモデルから求めた配筋量を開口部により欠損した量を周辺に配置すれば良い。ただし開口部の四隅に補強鉄筋を

配置することは勿論である。

4.3 ひびわれ幅

図-16 に同じく RC 試験体での開口部側、図-17 に開口部のない側で得られた測定記録より求めた鉄筋の平均ひずみとひびわれ幅との関係を示す。分布荷重の載荷の試験体では円筒壁の円周方向が純引張状態となるので、ひびわれが発生した直後からひびわれ幅が大きくなる傾向がある。開口部のある側では、鉄筋の平均ひずみが 200~300  $\mu$  のときに既に 0.1~0.2 mm のひびわれ幅が生じた。開口部のない側でも鉄筋の平均ひずみが 500  $\mu$  のとき 0.2 mm 近いひびわれ幅が生じた。鉄筋の平均ひずみが小さいときに CEB/FIP で示される最大ひびわれ幅よりも大きなひびわれ幅が試験では得られないことになる。PC の円筒壁では、内側からの荷重に対してひびわれが生じ易く、かつ鉄筋ひずみ量が小さいときにもひびわれ幅が制限値よりも大きくなる可能性があるため注意が必要である。設計では、使用限界状態においてひびわれの発生を許さないようにプレストレスを導入するのが良い。土圧と水圧が常時内側より作用する内側円筒壁では、ひびわれの発生を極力避けた方が良く、プレストレスの導入が必要と考える。

4.4 押抜きせん断力<sup>8),9)</sup>

図-18 に No. 1 の試験体での押抜きせん断破壊の状況を示す。この試験体では、表-3 に示すように載荷荷重が 42.2 tf のとき押抜きせん断によって終局に至った。式 (1) を用いて図-3 を参考に開口の影響を考慮して計算した試験体の押抜きせん断力の計算値は 13 tf である。

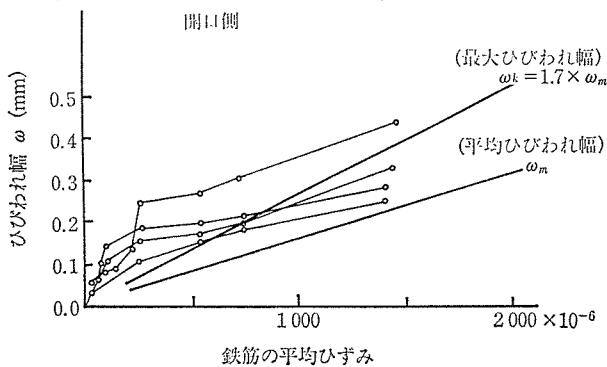


図-16 開口側での鉄筋ひずみとひびわれ幅の関係

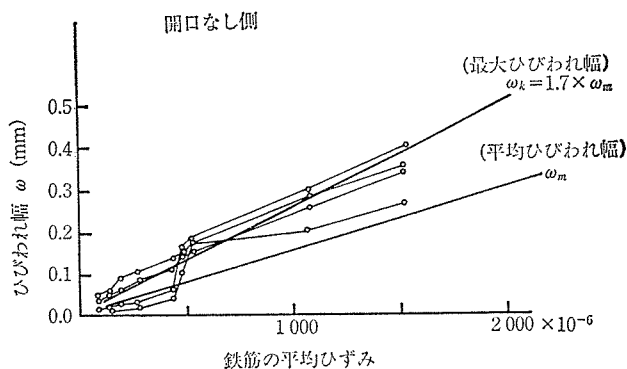


図-17 開口ない側での鉄筋ひずみとひびわれ幅の関係

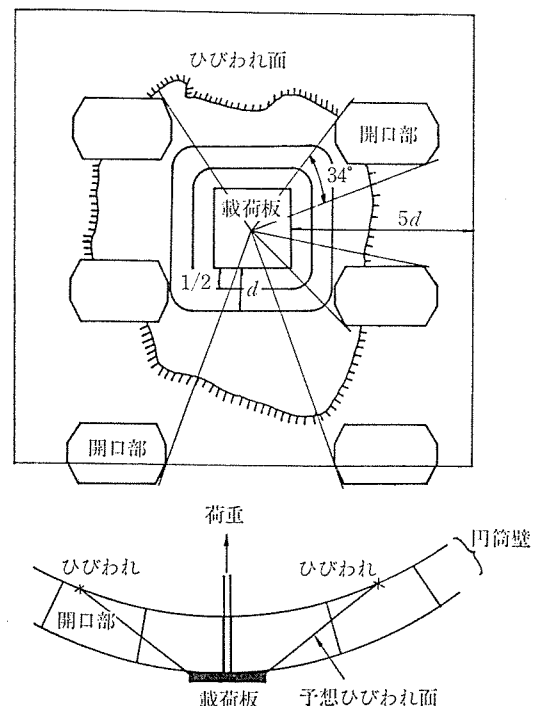


図-18 押抜きせん断破壊の状況

このときの開口の影響による検討断面の周長 ( $u_p$ ) の低減率は 0.38 である。すなわち  $u_p$  の 62% しか有効でないことになる。計算値と実験値との開きは大きい。

この原因として、円筒部材の曲率の影響と開口部周辺の補強とが考えられる。円筒壁では、載荷版直下のコンクリートの圧縮領域が平面部材より広がる。載荷試験での押抜きによるひびわれ状況を勘案して  $u_p$  を計算すると  $u_p$  が 1.3 倍長くなる。さらに  $u_p$  を計算するとき開口部を横切らなければ  $u_p$  の低減をしないと考えると、計算値と実験値とが比較的よく一致する。表-3 の計算値は、これらの円筒壁の曲率と開口部での検査長の低減を考慮しないときの値である。

以上述べたとおり破壊は載荷点付近に集中する。船舶などの衝突では円筒壁の破壊が衝突箇所に限定されることを示している。

## 5. 結 論

- ① 多孔を有する円筒部材に水平方向から集中載荷を行ったところ、円筒部のかなり広い範囲に曲げひびわれが発生したが、最終的には載荷点での押抜きせん断によって破壊に至った。内側からの等分布載荷では円筒部の鉛直方向にひびわれが等間隔に発生した。このひびわれは円周方向の軸引張力によるものである。最終的には、円筒部の外側に膨らみ出し鋼材の伸びが進行して終局に至った。
- ② 開口部が存在する部分と存在しない部分とで破壊性状、ひびわれ幅、鉄筋のひずみ量などに大きな差はなかった。開口部より四隅で破壊が集中せず、今回の補強方法を行えば開口部が特に構造的弱点とならない。20% 程度以下の開口率を有する円筒壁では、開口の影響を考慮せずに構造設計を行っても断面諸元に大きな影響を与えない。
- ③ 開口部が多数存在する場合の押抜きせん断耐力の検討では、既往(限界状態設計法, FIP)の設計式で述べられる方法によると実験値の半分にも満たない耐力しか算定しない。円筒壁の外から集中荷重が作用する場合には、曲率の影響により部材に生じる軸圧縮力で中立軸の引張側への移行することに対する検討断面の周長が長くなると考えるのが良い。また開口部の補強を十分に行ってあれば、検討断面の周長の低減を CEB-FIP に示されるように大きく低減しなくてもよさそうである。

- ④ 内側から等分布荷重を受ける PC 製の円筒壁では円周方向に軸引張力が生じてひびわれが発生する。ほぼ純引張状態でひびわれが一旦発生すると、ひびわれ幅の値は急激に大きくなり、CEB-FIP 式で計算される最大ひびわれより大きな値となり注意が必要である。腐食環境の厳しい飛沫帯では、ひびわれの発生を許さない設計法・施工法の採用がよい。

## 6. あとがき

現在、境港(鳥取県)と長島港(三重県)で二重円筒ケーソンの建設が進められている。PC ケーソンについては、平成2年度に試験堤として建設予定である。二重円筒ケーソンの開発では、運輸本省で海洋構造物の沖合展開のための開発研究の一環として研究会(座長 元良誠三)、また現地での建設、施工に関しては第3港湾建設局の委員会(委員長 合田良実)で審議検討がなされており、各委員より貴重な提言や意見を頂いている。ここに関係各位に感謝の意を表します。

### 参 考 文 献

- 1) 谷本勝利, 他5名: 大水深波浪制御構造物に関する水工的研究(その4)二重円筒ケーソン(海底設置型)の水理特性と試験設計, 港湾技研資料, No. 600, 1987年9月, 21p
- 2) 清宮 理, 白崎正浩: 二方向から面内引張力を受けるコンクリート板の力学特性, 港湾技研資料, No. 632, 1988年9月, 29p
- 3) 清宮 理: PC円筒波浪制御構造物の面内力の一検討, プレストレストコンクリート, 第31巻第2号, 平成元年, 3, 4月号, pp. 41-47
- 4) 清宮 理, 酒井久和: 船舶の衝突による防波堤ケーソンの安全性の検討, 土木学会第44回年次学術講演会講演概要集第I部, 平成元年10月, pp. 576-577
- 5) Ceb-fip model code for concrete structure, CEB-FIP International Recommendations 3rd Editions 1978, COMITE EUROINTERNATIONAL DU BETON, pp. 131~134
- 6) 土木学会: コンクリート標準示方書(設計編), 昭和61年制定, pp. 55~58
- 7) 清宮 理, 横田 弘, 白崎正浩: 多数の開口を有する円筒壁の耐力の実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 36, 1990年(投稿中)
- 8) 大野定俊, 水谷 隆, 小柳 治: RCスラブの押抜きせん断破壊のモデル化と終局耐力, RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集, 1982年6月, pp. 69~76
- 9) 角田与史雄, 井藤昭夫, 藤田嘉夫: 鉄筋コンクリートスラブの押抜きせん断耐力に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第229号, 1974年9月, pp. 105~115

【1989年10月5日受付】