

企画課長

# 港湾技研資料

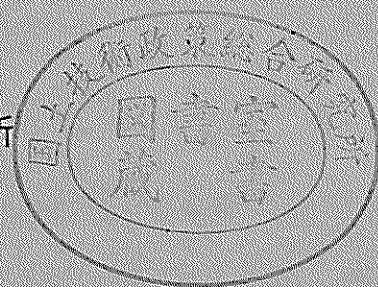
TECHNICAL NOTE OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 690 Dec. 1990

多数の開口を有するコンクリート円筒壁の力学特性

清 宮 理  
白 崎 正 浩  
横 田 弘

運輸省港湾技術研究所



## 目 次

要 旨 .....	3
1. ま え が き .....	3
2. 研究の背景 .....	4
2.1 二重円筒ケーソンの研究概要 .....	4
2.2 構造設計法の概略 .....	6
3. 載荷試験の方法 .....	7
3.1 試験体の製作 .....	7
3.2 載荷方法 .....	11
3.3 測定項目 .....	12
4. 載荷試験の結果 .....	14
4.1 破壊状況 .....	14
4.2 変形状況 .....	17
4.3 鋼材のひずみ .....	17
4.4 コンクリートのひずみ .....	20
4.5 ひびわれ幅 .....	20
5. 有限要素法による計算 .....	23
5.1 計算モデル .....	23
5.2 計算結果 .....	24
6. 円筒壁の力学性状の考察 .....	28
6.1 耐 荷 力 .....	28
6.2 ひびわれ幅 .....	30
6.3 プレストレスの導入 .....	30
7. 結 論 .....	31
8. あ と が き .....	32
参 考 文 献 .....	32

# Strength Properties of a Cylindrical Wall with Many Openings

Osamu KIYOMIYA\*

Masahiro SHIRASAKI\*\*

Hiroshi YOKOTA\*\*\*

## Synopsis

A double-cylindrical caisson is to create a wide calm water region in deep sea around Japan. The cylindrical wall is subjected to wave forces, impact forces by a ship and so on. Static loading tests are carried out to investigate the strength and crack properties of reinforced concrete and prestressed concrete cylindrical walls with many rectangular openings. Four specimens are manufactured. A concentrated load is applied from outside at the center of two specimens by a loading jack. For the other two specimens, uniform distributed loads are applied from inside by water pressures through a rubber bag.

On the basis of the test results, it is made clear that influence by the openings is small on the mechanical properties of the cylindrical wall, when suitable reinforcement is supplied.

**Key Words :** Cylindrical wall, Loading test, Opening, Punching shear, Prestress

---

\* Chief of Structural Mechanics Laboratory, Structural Engineering Division

\*\* Ex-member of Structural Mechanics Laboratory, Structural Engineering Division

\*\*\* Ex-Senior Research Engineer, Structural Engineering Division

# 多数の開口を有するコンクリート円筒壁の力学特性

清 宮 理\*  
白 崎 正 浩\*\*  
横 田 弘\*\*\*

## 要 旨

現在2, 3の地点で建設が進められている二重円筒ケーソンの主要な構成部材である円筒壁には、多数の長方形の開口が設けられている。開口率は、10~20%である。開口は一般的に構造的な弱点と言われているので、今回、載荷試験により、開口が円筒壁の強度特性にどのような影響を与えるのか確認を行った。載荷試験は、鉄筋コンクリートおよびプレストレストコンクリート製の試験体に集中荷重と等分布荷重を載荷して行った。試験結果から、今回の補強法を採用すれば、特に開口が構造的な弱点となることは無いことが確認された。また、開口を有する円筒壁の押し抜きせん断耐力の算定方法とプレストレスの導入方法（二次応力問題）についても検討を行った。

キーワード：円筒壁、載荷試験、開口、押し抜きせん断、プレストレス

## 1. まえがき

沿岸域に広大な静穏海域を創成する目的で建設される波浪制御構造物は、海岸より離れた沖合に線状に設置され、海外から進入する波浪を制御する。近年、より広大な静穏海域が求められ、より条件の厳しい大水深の地点において建設可能な波浪制御構造物の開発が急がれている。大水深海域で採用可能な波浪制御構造物の一つに、二重円筒ケーソン式防波堤がある。図-1にこの概要を示す。二重円筒ケーソンは鉄筋コンクリート製またはプレストレストコンクリート製で、外側円筒壁、内側円筒壁、底板、中間床板などが主要な構成部材である。外側円筒壁の外海側には、多数の長方形の開口が設けられている。開口は、外側円筒壁と内側円筒壁との間の遊水部に波を導き、エネルギーを消費させる役割をする。開口の総面積は、外海側に面した円筒壁部の全面積の10~20%である。二重円筒ケーソン式防波堤の水理的<sup>1)</sup>、構造的課題などについては、昭和57年度より港湾技術研究所で研究開発が進められてきている。現在、境港（鳥取県）、長島港（三重県）などの港湾区域においてこの防波堤の建設が進められている。

二重円筒ケーソンに作用する主たる外力は、波力、地震力、地盤反力、船舶の衝突力などである。構造設計で

は、これらの外力で発生する曲げモーメント、せん断力および軸力を有限要素法（弾性解）により計算し、これらの断面力に耐えるように部材の諸元を設定する。円筒壁における断面力として面外力と面内力の両者が重要である。面内力、特に軸引張力によるコンクリート板の構造設計法については、港湾技研資料 No. 632<sup>2)</sup>に報告済である。二重円筒ケーソンの構造的特徴の一つは、開口が円筒壁に多数設けられていることである。円筒壁全体の強度特性に多数の開口が及ぼす影響については、まだ十分に把握されていない。開口の壁構造に及ぼす影響については、建築物の壁における窓、原子力格納容器におけるパイプ用の開口などで検討されてきている<sup>3)</sup>。しかし、広い範囲に多数の開口が存在する場合における円筒壁の力学的な挙動については、知見が十分でない。

本研究では、集中荷重あるいは等分布荷重を受ける円筒壁について載荷試験を行い、強度、ひびわれ性状などの力学性を把握し、現在行われている構造設計法の妥当性、開口の補強法などについて検討を行う。その際、集中荷重載荷では局部的な破壊、特に円筒壁の押し抜きせん断に、等分布荷重載荷では円筒壁の円周方向に発生する軸引張力に着目し、力学的な挙動を把握する。

また、ひびわれ抑制にはプレストレスの導入が考えられるが、導入方法によってはコンクリートに引張りずみ

\* 構造部 構造強度研究室長

\*\* 港湾局建設課（前構造強度研究室）

\*\*\* 第二港湾建設局横浜調査設計事務所（前構造部主任研究官）

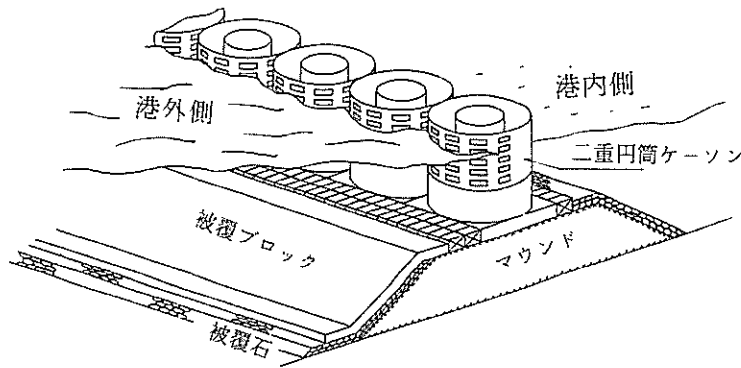


図-1 二重円筒ケーソンの概要

の生じる場合があり、ひびわれの発生する可能性がある。そこで、プレストレスの導入に伴う二次応力の状況を試験体製作時に再現し、今回の導入方法で適切にプレストレスが導入できるかを確認する。

## 2. 研究の背景

### 2.1 二重円筒ケーソンの研究概要

図-2 に二重円筒ケーソンの構造の概略を示す。このケーソンの研究開発については、港湾技研資料 No. 600<sup>1)</sup> に報告されているので、ここでは簡単に概要を示す。二重円筒ケーソンは、外側円筒壁と内側円筒壁の二重の円筒部材で構成されている。従来から良く使われてきた箱形のケーソンは波の力を直接受けるため、前面に大規模な消波ブロックを置いたり、マルチセルラーケーソンのように特殊な消波機能を持つ相当工夫された構造形式にすることなどが必要である。これに対して、二重円筒ケーソン曲面構造によって直立壁よりケーソン全体に作用する波の力を低減し、かつ開口から海水を通して遊水部で残りのエネルギーを消費させる構造となっている。つまり、大規模な消波ブロックを設置する必要がなく、大水深かつ波浪条件の厳しい箇所でも比較的低廉に波浪制御構造物を建設することが可能となる。このケーソンの開発は始まったばかりであり、大水深域に直接建設するにはまだ解決しなければならない多くの問題がある。そこで現在、比較的水深の浅い境港（鳥取県）で、実証試験を兼ねた二重円筒ケーソンの建設が進行中である。このケーソンの直径は 16.32m、高さは 10.40m で、中詰砂投入前におけるケーソン重量は約 1500t である。また、長島港（三重県）では離岸堤としてこのケーソンの建設が進められている。この港では、二重ケーソンの形状が周囲の自然環境に良く適合することも採用理由の一つに挙げられた。

二重円筒ケーソンの開発研究は、港湾技術研究所なら

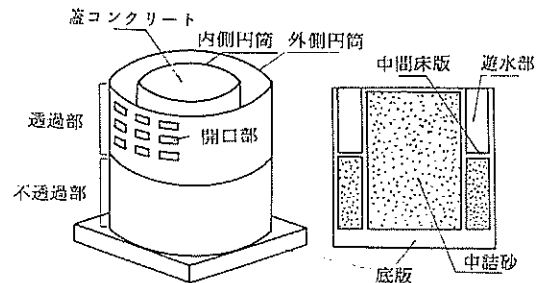


図-2 二重円筒ケーソンの概要

びに第三港湾建設局が中心となって行ってきた。新形式のこのケーソンの構造設計は、従来の箱形のケーソンにおける構造設計法をそのまま適用することができない。そこで、構造的な課題を解決しつつ新たに構造設計法を整備することとなった。構造設計法では、断面力の算定に有限要素法が用いられている。有限要素法は底板の形状、渡板の影響、開口付近の応力集中などを部材単位だけでなく構造全体系においても容易に検討ができる計算法である。また、部材の断面諸元（鋼材量、板厚など）の設定には、限界状態設計法が採用されている。ここでは、

- ① 円筒壁の最終的な耐荷力と関連する終局限界状態
- ② 材料の耐久性と関連する使用限界状態
- ③ 繰り返し作用する波浪に対する疲労限界状態

の三種類の限界状態について検討が行われている。コンクリート製港湾施設で、本格的に限界状態設計法が用いられたのは二重円筒ケーソンが初めてである。

円筒部材には面内力と面外力の両者に作用する。円筒構造物を対象としたこれらの断面力に関する検討は、穀物サイロ、原子炉格納容器などで行われているが、港湾構造物では建設例がほとんど無く、設計法の十分整備されていない。港湾施設では、陸上の構造物とは外力条件が異なるうえに、材料の劣化に対しても十分な検討が必

要であるので、陸上施設での構造設計法を考慮しつつも海洋環境下での独自の検討が求められる。

開口を持つ部材の内面力に対する耐荷力とひびわれ性状については、前述の資料に述べられているが<sup>2)</sup>、この構造様式の全体系における力学性状についてはまだ知見が十分でない。

二重円筒ケーソンに作用する主たる外力は、波力、地盤反力、地震力、中詰土圧、衝突荷重などである。図-3にこれら外力のうち、船舶の衝突および波浪時の外力の作用状況について示す。通常、箱型のケーソンでは、押し波時の波力により断面寸法が設定される場合が多い。円筒構造では、押し波時に作用する波力のように、外側から分布荷重に対しては軸圧縮力が卓越し、強度的にかなり強くなる。しかし、一部分に作用する集中荷重や内側から作用する荷重に対しては、軸引張力が発生し、強度的にかなり弱くなると考えられる。

従来の箱型の一般的な防波堤ケーソンで、船舶の衝突に対する耐荷力の検討をした例はほとんどない。これは、

- ① 船舶が衝突する可能性が極めて小さいと考えられている
- ② ケーソン前面には、普通消波ブロックが積み上げられており、船舶の衝突がケーソン本体に直接危害を及ぼす可能性はないと考えられる
- ③ 設計を行うにしても船舶の大きさ、速度などの設定が困難である

ことなど種々の理由によっている。また、万一衝突してもケーソン本体の破壊は局部的で、中詰土の流失も内部に設けられた隔壁により範囲が限定されると考えられているからである。しかし、二重円筒ケーソンの場合は、消波ブロックによる保護もなく、衝突する可能性のある部分は一枚のコンクリート製円筒筒壁であり、衝突に対す

る耐荷力の検討も必要<sup>4)</sup>となる。検討には、大型船舶は別としても、小型船舶（漁船など）や流木などが衝突した場合において、外側円筒壁が破壊しないか、また局所的な破壊がケーソン全体の安定に影響しないかが対象となる。海洋構造物における船舶の衝突の検討<sup>5)</sup>は、北海の石油掘削施設、本州四国連絡橋の下部工などで行われている。港湾区域内では船舶の速度がさほど速くないことから、衝突問題で、動的な取扱をしなくても良いと言われている。静的な問題としての検討は、簡便な方法として、船舶が持つ運動エネルギーとケーソンが破壊に至るまでに消費するエネルギーとの比較により行う<sup>6)</sup>。

$$\begin{aligned} \text{船舶の運動エネルギー} & : 0.5 m V^2 \\ \text{ケーソンの消費エネルギー} & : P_v \delta_v - 0.5 P_v \delta \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 $m$  : 付加質量を考慮した船舶の質量

$V$  : 船舶の速度

$P_v$  : ケーソンの終局耐荷力

$\delta_v$  : ケーソンの終局の変位

$\delta$  : ケーソンの弾性範囲の最大変位

引き波時にはケーソン前面の水位が低下し、内部土圧により内側円筒壁に軸引張状態が生ずる。押し波時でも波の峰がケーソン中央すなわち内側円筒壁に来るときには、内側から外側に波圧が作用し、外側円筒壁に軸引張状態が発生する。この状況を図-4に示す。通常的设计では、鉄筋コンクリートの引張力は考慮しない。すなわち、ひびわれが発生することを前提として、引張力に対して鋼材のみが抵抗することになっている。しかし、特に海洋環境下では、過度のひびわれは内部の鋼材の腐食に悪影響を与えるとされており、極力ひびわれを抑えることが重要となる。ただし、一般的に、軸引張力により発生するひびわれは曲げ引張状態と異なり、発生と同時に

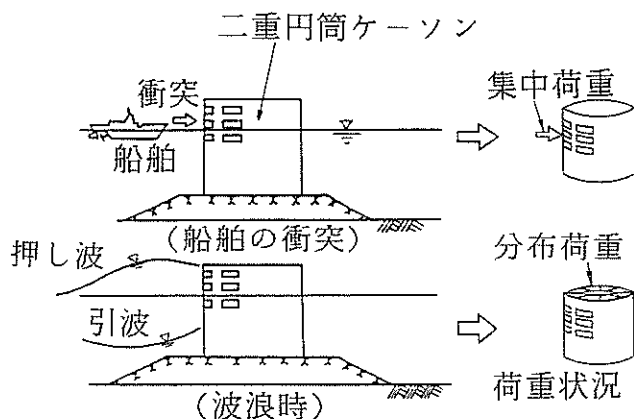


図-3 二重円筒ケーソンにおける外力の作用条件

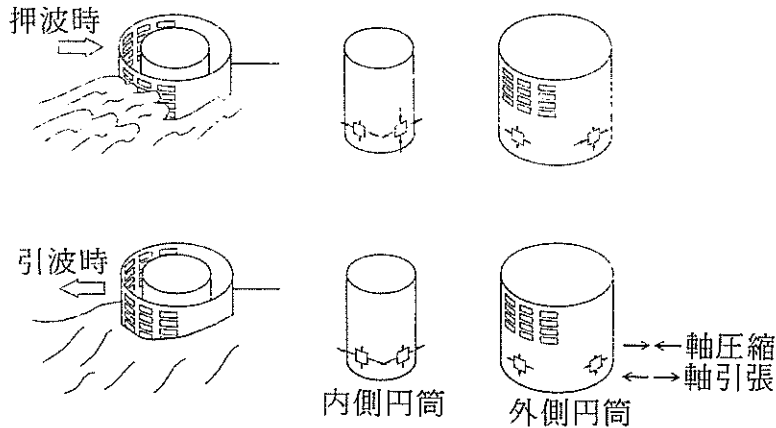


図-4 波浪の状況と応力との関係

にひびわれ幅が急増し、制御は非常に難しい。現在、純引張状態における鉄筋コンクリート部材のひびわれ制御はまだ十分とは言えず、多くの課題が残されている。

また、円筒壁を採用する場合には、このほかにも解決すべき構造的な課題がまだ多く残されている。特に、開口の円筒壁全体に及ぼす影響も検討しなくてはならない。一様な軸引張力を受ける板部材における、長方形の開口の周辺の応力集中係数については、光弾性実験により調べられている<sup>7)</sup>。しかし各設計指針類では、開口を有する鉄筋コンクリート部材の強度の算定方法は提案されおらず、この応力集中に対しては、四隅に設けるハッチと開口周辺に配置する補強鉄筋で対応させている。すなわち、構造細目として開口の補強方法を示しているにすぎない。また、今回の円筒壁のように、多数の開口が存在する場合の補強法についての知見は少ない。

以上の理由から、円筒壁の模型載荷試験により、円筒壁の全体系における力学性状を把握し、検討することとした。

## 2.2 構造設計法の概略

### (1) 曲げ耐力

円筒壁の軸力と曲げに対する耐力の値は、次式を用いて計算できる。円筒壁断面に算作用する力の状況を図-5に示す。

$$N_u = C + T_{sc} - T_{sr} - T_p$$

$$M_u = C(h/2 - 0.4x) + T_{sc}(h/2 - d_c) + T_x(d_i - h/2) + T_p(d_p - h/2)$$

ここで、 $N_u$  : 軸耐力

$C$  : コンクリートの圧縮力の合力

$T_{sc}$  : 圧縮鉄筋の圧縮力の合力

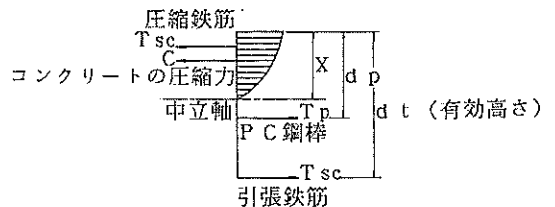


図-5 部材における力の釣合い

$T_{sr}$  : 引張鉄筋の引張力の合力

$T_p$  : PC鋼棒の引張力の合力

$M_u$  : 曲げ耐力

$x$  : コンクリートの圧縮縁から中立軸までの距離

$d_c$  : コンクリートの圧縮縁から圧縮鉄筋までの距離

$d_i$  : コンクリートの圧縮縁から引張鉄筋までの距離

$d_p$  : コンクリートの圧縮縁からPC鋼材までの距離

$h$  : 部材厚さ

上記の式から距離  $x$  を求め、耐力の算定を行う。

### (2) 押し抜きせん断力<sup>8), 9)</sup>

船舶などの衝突では、円筒壁の一点に集中的に荷重が作用するので、押し抜きせん断の検討が必要である。押し抜きせん断の耐力  $V_{pcd}$  は、次式で得ることができる。

$$V_{pcd} = f_{pcd} \cdot u_p \cdot d / \gamma_b \quad (3)$$

(2) ここで、 $f_{pcd} = 0.6 \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_r \cdot \sqrt{f_{cd}'}$

$$\beta_d = \sqrt[4]{100/d}$$

$$\beta_p = \sqrt[3]{100 \times p}$$

$$\beta_r = 1 + 1 / (1 + 0.25 u / d)$$



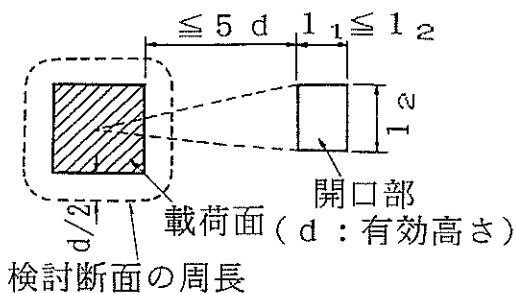


図-6 押し抜きせん断力の考え方

- $f_{cd}$  : コンクリートの圧縮強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)
- $u_p$  : 検討断面の周長 (cm)
- $u$  : 載荷面の周長 (cm)
- $d$  : 有効高さ (cm)
- $p$  : 鋼材比
- $\gamma_s$  : 部材係数

載荷点付近に開口が存在するときには、押し抜きせん断耐力は一般的に低下するとされている。CEB-FI P<sup>10</sup>,<sup>11)</sup> などでは、検討断面の周長を図-6に示す範囲で低減して耐荷力の低下を考慮している。つまり5dの範囲内で、開口で欠損する部分を検討断面の全周長から差引いた周長で押し抜きせん断力を計算する。

### (3) ひびわれ幅

海洋環境下に置かれたコンクリート部材では、構成材料の耐久性の観点からひびわれ幅を制限する。このひびわれ幅の算定式として、プレストレスの影響や純引張の影響が考慮できる CEB-FIP の式<sup>10)</sup> が用いられている。式(4)にこの算定式を示す。

$$\text{最大ひびわれ幅} : W_k = 1.7 S_{r,m} \cdot \epsilon_{s,m} \quad (4)$$

ここに、 $S_{r,m}$  : ひびわれ間隔

$\epsilon_{s,m}$  : 鋼材のひずみ量

## 3. 載荷試験の方法

### 3.1 試験体の製作

#### (1) 試験体の構造

載荷試験に使用した試験体の総数は4体である。この内の2体は鉄筋コンクリート製（以下 RC と略す）で、残りの2体はプレストレスコンクリート製（以下 PC と略す）である。図-7にRC試験体の、図-8にPC試験体の概略図を示す。本試験では円筒壁の基本的な力学的性状を把握することを目的としている。したがって、試験体は二重の円筒とせず、一重の円筒に簡略化した。試験体の円筒壁は外径200cm、高さ180cm、厚さ13cmで、円筒壁の下端に、縦230cm、横230cm、厚さ20

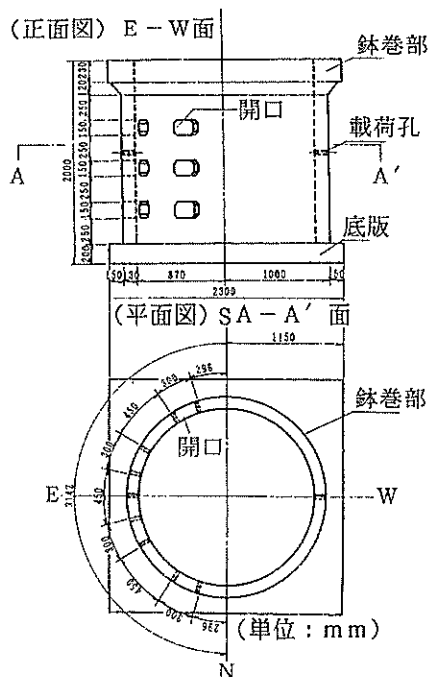


図-7 RC試験体の外形図

cmの正方形の底板がついた構造である。円筒壁と底板とは、剛結であるが、ハンチは取付けてない。円筒壁の外径の寸法は、実物の外側円筒の約1/10である。試験体の上部には、現地で行われる円筒壁上部の補強を考慮して、上端23cmの部分の厚さを25cmの鉢巻き状とする。また、PC試験体では、開口の存在する側と存在しない側との境界にピラスターと呼ばれるPC鋼棒の定着部を設ける。試験体前面の円筒壁には、縦3列、横4列の計12箇所に長方形の開口を設ける。開口の大きさは縦15cm、横30cmで、4隅は寸法3cmのハンチを設ける。ハンチを設けることにより、応力集中と補強鉄筋のかぶりを確保する。

図-9にRC試験体の、図-10にPC試験体の配筋図を示す。円筒壁部に、RC試験体では鉛直方向に9本×2段/m、円周方向に10本×2段/mの割合で直径10mmの異形鉄筋を配筋する。PC試験体では鉛直、円周方向ともに5本×2段/mの割合で直径10mmの異形鉄筋を配筋し、断面の中心に直径9.2mmのPC鋼棒を鉛直方向に2.86本/m、円周方向に2.5本/mの割合で配置する。したがって、円筒壁の各方向における鋼材比は、

- ① RC試験体 鉛直方向………0.011  
円周方向………0.012
- ② PC試験体 鉛直方向………0.008



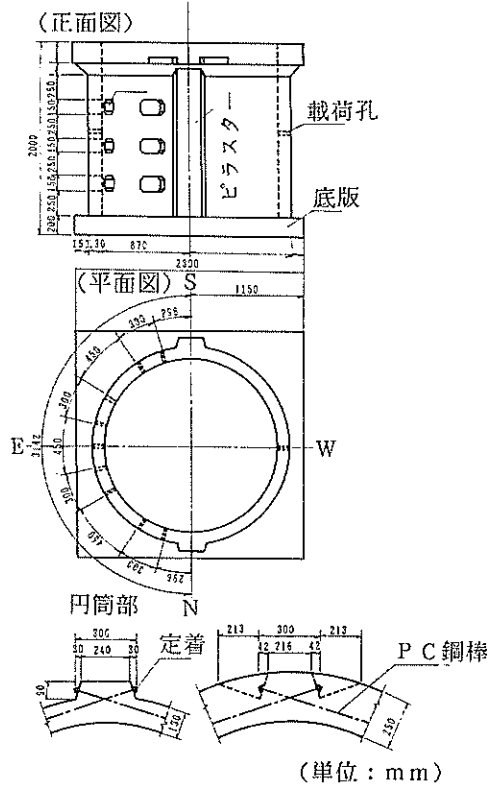


図-8 PC試験体の外形図

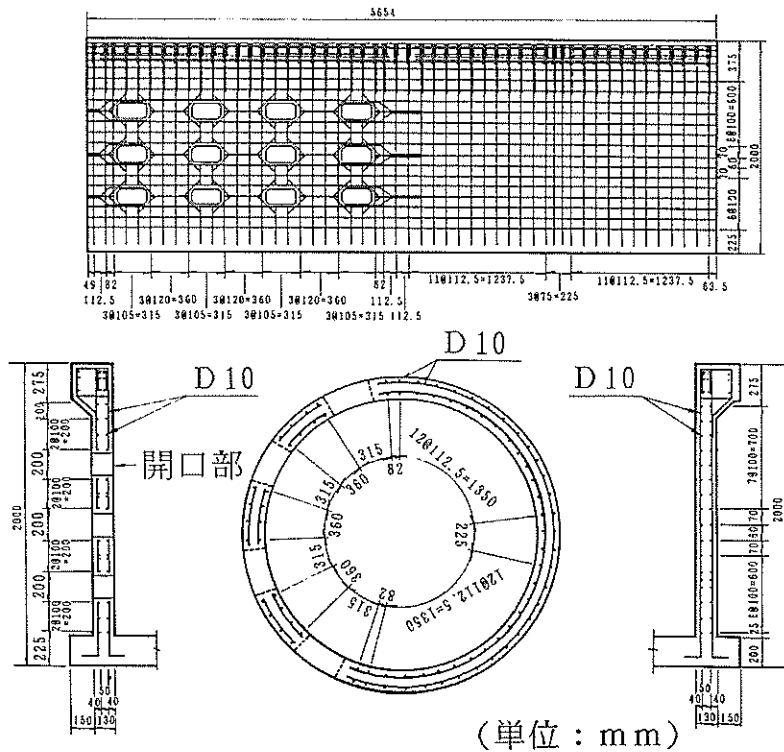


図-9 RC試験体配筋図



表-3 セメントの試験結果

項目 種類	比重	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	凝 結			安定性	圧縮強さ(kgf/cm <sup>2</sup> )				酸化マグ ネシウム (%)	三酸化 硫黄 (%)	強熱減量 (%)	塩 素 (%)
			水 量 (%)	始 発 (時-分)	終 結 (時-分)		1 日	3 日	7 日	28 日				
早強ポ ルト ランド セメント	3.13	4,330	29.8	2-16	3-14	良	157	281	383	481	1.7	2.8	1.1	0.004

表-4 管理供試体の試験結果

試験体名	コンクリート強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )					
	緊張時 圧縮	試験時			材令28日	
		圧縮	割裂	曲げ	圧縮	曲げ
RC-1	-	218	21	33	210	35
RC-2	-	226	23	30	238	45
PC-1	279	312	30	50	339	48
PC-2	292	342	32	54	347	61

は、RC試験体が180kgf/cm<sup>2</sup>、PC試験体が300kgf/cm<sup>2</sup>である。プレストレス導入、材令28日および載荷試験時におけるコンクリート強度の管理は、φ10×20cmの管理供試体により行う。表-4に管理供試体の強度試験結果を示す。

(3) プレストレスの導入<sup>12), 13)</sup>

プレストレスの導入は底版、円筒壁の鉛直方向および円筒壁の円周方向の順序で行う。この手順を図-11に示す。これは、現地で施行できる順序を想定している。底版と鉛直方向における鋼棒の緊張方法は、油圧ジャッキによる片引きとする。また、円周方向については、一周当たり2本のPC鋼棒を使用して半円ずつプレストレス導入を行う。この際の鋼棒の緊張方法は両引きとする。導入量の管理は、センターホールジャッキに取付けたロードセルによって行う。目標の有効プレストレス量は、コンクリート応力に換算して、底版および鉛直方向で10.0kgf/cm<sup>2</sup>円周方向で8.1kgf/cm<sup>2</sup>である。PC鋼棒の緊張端における引張力は、有効断面における目標の有効プレストレス量を1本あたりに換算し、以下の式により得られる減少量を考慮して設定する。

① PC鋼棒とシースとの摩擦による減少

$$\sigma_{pt} = \sigma_{pt1} e^{-(\mu\alpha + \lambda l)} \quad (5)$$

ここで、 $\mu$  : 角変化1ラジアンあたりの摩擦係数

$\alpha$  : 角変化 (rad)

$\lambda$  : PC鋼棒1mあたりの摩擦係数

$l$  : PC鋼棒の長さ (m)

$\sigma_{pt1}$  : 緊張端での引張応力度 (kgf/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_{pt}$  : 摩擦による減少を考慮した引張応力度 (kgf/mm)

② コンクリートの弾性変形による減少量

$$\Delta\sigma_{pt} = \frac{1}{2} n \sigma_{cs} \frac{N-1}{N} \quad (6)$$

ここで、 $n$  : ヤング係数比= $E_p/E_c$

$E_p$  : PC鋼棒のヤング係数

$E_c$  : 緊張時コンクリートのヤング係数

$\sigma_{cs}$  : プレストレス力によるコンクリート応力度

$N$  : PC鋼棒の緊張回数

この結果、各鋼棒端部における目標緊張量は、底版では76kgf/mm<sup>2</sup>、鉛直方向では69kgf/mm<sup>2</sup>、円周方向では93kgf/mm<sup>2</sup>となる。円周方向の緊張量は、鋼棒の降伏強度に近い値になる。

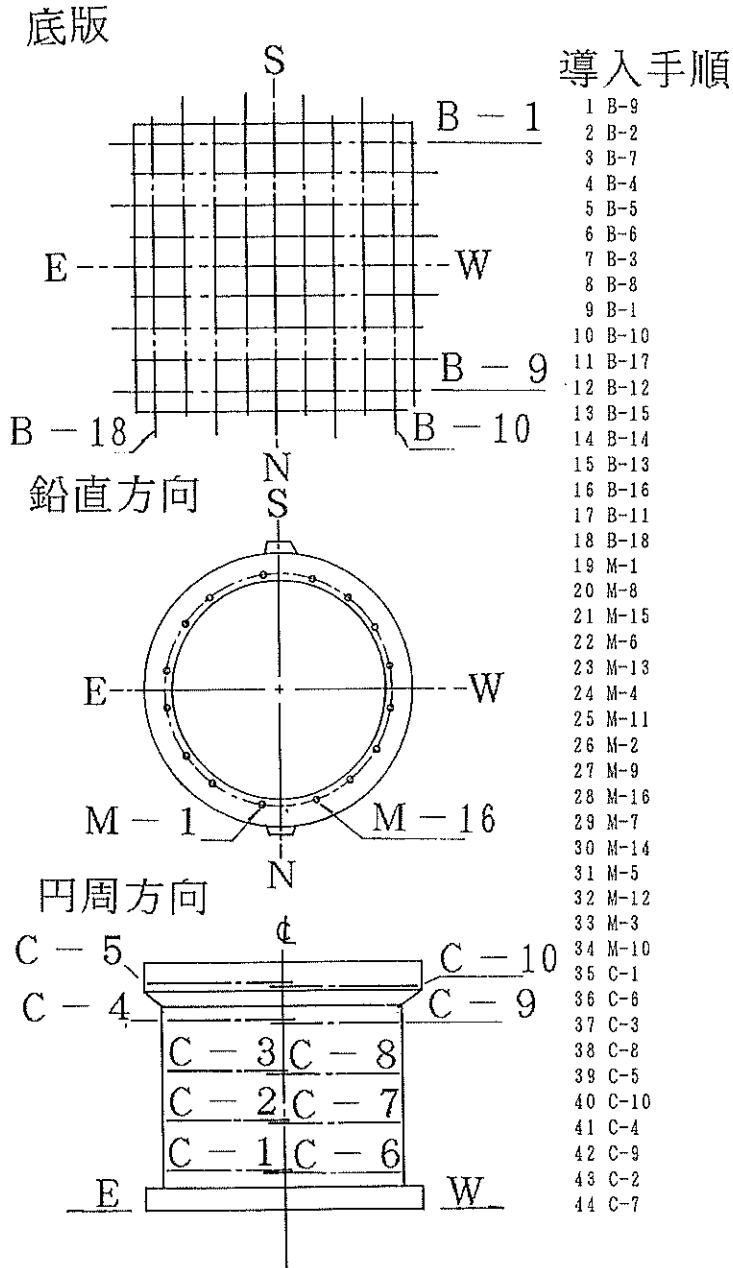


図-11 PC鋼棒の位置

### 3.2 載荷方法

#### (1) 集中荷重載荷

集中荷重載荷は、船舶などの衝突などによる集中荷重を想定している。図-12に集中荷重載荷試験の概要を示す。載荷試験の状況を写真-1に示す。

集中荷重載荷試験は、円筒壁下端から87.5cmの位置の円筒部中央を通る線上に直径32mmのPC鋼棒を水平方向に通し油圧ジャッキ（容量50tf）を用いて両側か

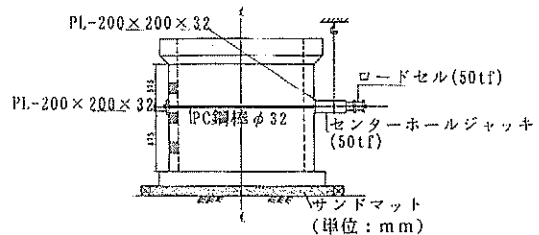


図-12 集中荷重載荷試験の概要

ら静的に荷重を行う。したがって、荷重は、円筒壁の外側より集中的に作用することになる。縦200mm、横200mm、厚さ32mmの正方形の鋼板を試験体と油圧ジャッキ間に入れてある。載荷方法は、ひびわれ発生、鉄筋降伏、破壊の各状態に達するまで2~4tずつの荷重間隔で増加させ、そのつど除荷するという手順で行う。

### (2) 等分布荷重載荷

等分布荷重載荷は、円筒壁に内側から作用する土圧および波圧を想定している。図-13に等分布荷重載荷試験の概要を示す。また実験の状況を写真-2に示す。載

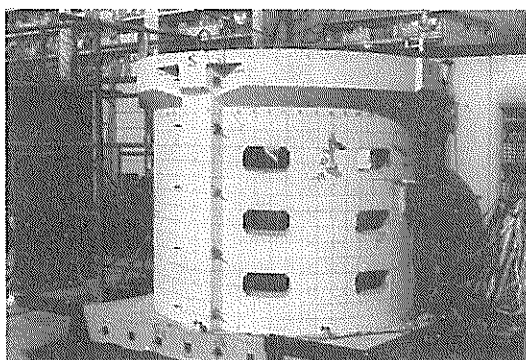


写真-1 集中荷重載荷試験

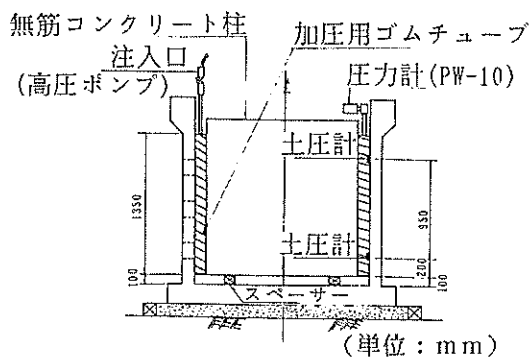


図-13 等分布荷重載荷試験の概要

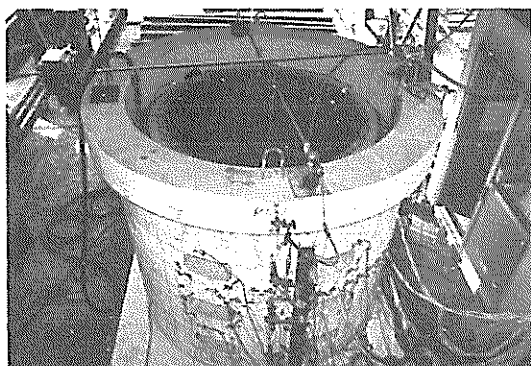


写真-2 等分布荷重載荷試験

荷は、水圧ポンプにより、円筒壁内に設置されたコンクリート柱に設けられた加圧用ゴムチューブを膨らませて行う。これにより、円筒壁下端から10~145cmの範囲にはほぼ様な分布荷重が内側より作用する。載荷方法は集中荷重載荷と同じく、ひびわれ発生、鉄筋降伏、破壊の各状態に達するまで0.5kgf/cm<sup>2</sup>ずつの荷重間隔で増加させそのつど除荷するという手順で行う。

### 3.3 測定項目

表-5に測定項目および測定に使用する計測機器を示す。

図-14にコンクリートひずみゲージ、図-15に鉄筋ひずみゲージの貼付位置を示す。コンクリートひずみゲージは、直交する2方向のひずみが計測できるものを1試験体あたり9枚貼付する。また、鉄筋ひずみゲージは、円筒部材の内側鉄筋と外側鉄筋にそれぞれ、鉛直方向20点、円周方向15点の計35点の場所に、1点当たり2枚ずつを貼付する。

ひびわれ幅は、パイ型ひずみゲージ、カンチレバー型変位計および二軸型亀裂変位計により測定する。図-16に集中荷重載荷でのパイ型ひずみゲージの取付位置を示

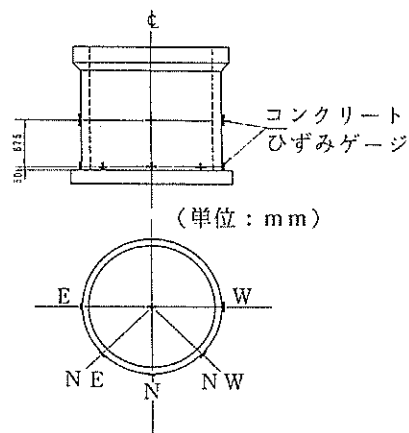


図-14 コンクリートひずみゲージ貼付位置

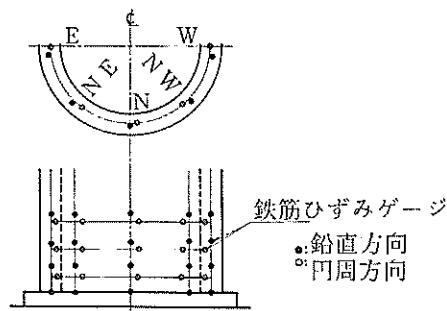


図-15 鉄筋ひずみゲージ貼付位置

表-5 測定項目

測定項目	測定機器	規格
載荷荷重	ロードセル	容量 50tf
コンクリートひずみ	コンクリートひずみゲージ	ゲージ長 30mm
鋼材のひずみ	鉄筋ひずみゲージ	ゲージ長 3mm
試験体変位	変位計 大変位計	容量 50mm 容量 100mm
ひびわれ幅	バイ型ひずみゲージ カンチレバー型変位計 二軸型亀裂変位計	100mm間隔, 容量 5mm 容量 5mm 容量 3mm
ひびわれおよび破壊状況	目視および写真	

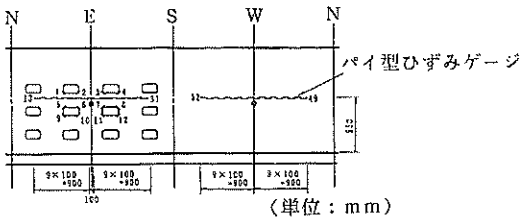


図-16 バイ型ひずみゲージ貼付位置

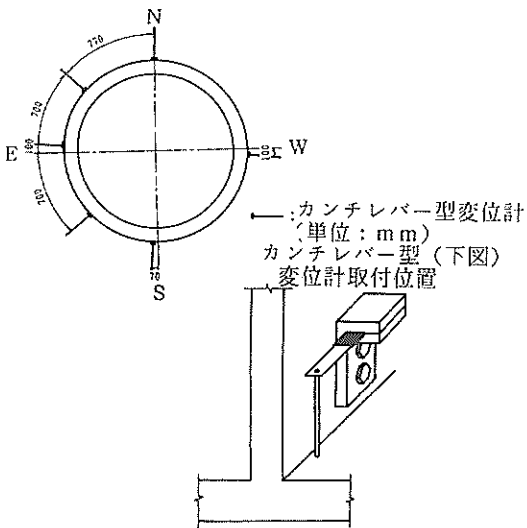


図-17 カンチレバー型変位計取付位置

す。バイ型ひずみゲージは標点間隔 10cm のものを、集中荷重載荷では円筒壁の内面に、等分布荷重載荷では外面に貼付する。図中の No.1-12 のバイ型ひずみゲージは、開口部の 4 隅に設置する。No. 13-31 は、開口の有る側、No. 32-49 は、開口の無い側の円筒壁表面に円周方向に 1 列に設置する。二軸型亀裂変位計は、ひびわれの幅とひびわれ面のずれが同時に測定できる変位計

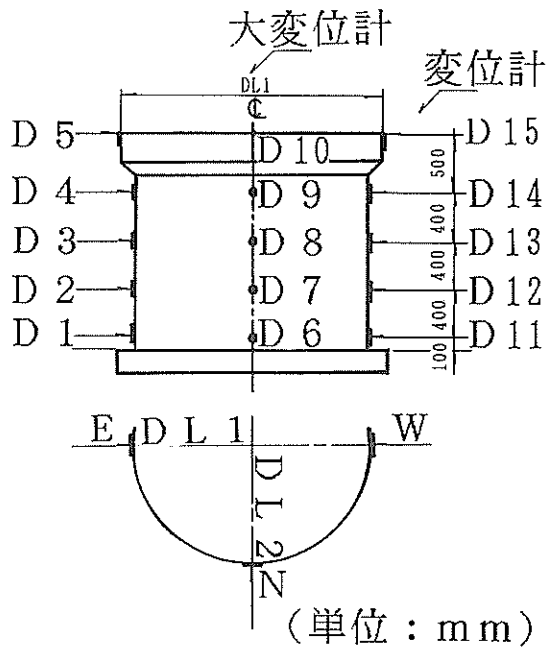


図-18 変位計および大変位計取付位置

である。初期ひびわれが発生した後に設置する。集中荷重載荷では円筒壁の内面に、等分布荷重載荷では外面に発生するひびわれを対象とし、開口の存在する側と存在しない側にそれぞれ 2 点ずつ貼付する。

図-17 にカンチレバー型変位計の設置位置を示す。カンチレバー型変位計は、1 試験体につき 6 台ずつ、集中荷重載荷では外面側、等分布荷重載荷では内面側の円筒壁と底版との結合部に設置する。この変位計は、図中に示すようにバイ型ゲージの貼れない部材の直交部での開きを計測できる。

試験体の変計状況は、15 台の変位計と 2 台の大変位計によって測定する。図-18 に変位計および大変位計

の取付位置を示す。15台の変位計は、底版端部に固定したH鋼を不動点として取付ける。大変位計は、長さ2mの棒の伸びを電氣的に計測するもので試験体の鉢巻き部の上端に直交して取付ける。

集中荷重載荷の管理は、センターホールジャッキに取付けたロードセル(容量50tf)によって行う。また、分布荷重載荷の管理は、水圧をかけるパイプに取付けた圧力計および加圧用ゴムチューブの表面に取付けた土圧計によって行う。

これらの計測は各荷重段階で行い、ストレインメータおよびパソコンによって記録する。また、試験体に生じたひびわれは目視により観察する。

#### 4. 載荷試験の結果<sup>14), 15)</sup>

##### 4.1 破壊状況

表-6に載荷試験で得られた結果の概要を示す。図-19~22に各試験体の荷重-変位曲線を示す。集中荷重載荷試験での荷重変位曲線は、円筒壁中央付近の開口側の、図-18で示すD3の位置の変位計と油圧ジャッキに取付けたロードセルから得られたものである。等分布荷重載荷では、D3の変位計とゴムチューブ内の水圧計より得られたものである。図-19に示すように集中載荷試験では、鋼材が降伏するにしたがって荷重変位曲線の勾配が緩やかになった。水平変位が7mmに達して押しぬきせん断が生じた時点で計測を終了した。押し抜きせん断が生じたときの荷重はRC試験体で37.5tf、PC試験体で42.2tfであった。図-21および図-22に示すように等分布荷重載荷では、鋼材が降伏すると勾配が、ほぼ水平になり荷重が増加せずに変位のみ進行した。ただしRC試験体の方がPC試験体よりもじん性が良かった。最大荷重時には、円筒壁が外側へ大きく膨れ出したが鋼材の破断は見られなかった。

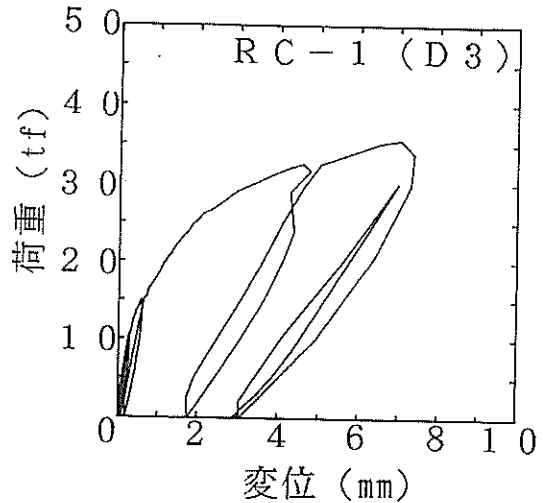


図-19 荷重-変位曲線 (RC:集中荷重載荷)

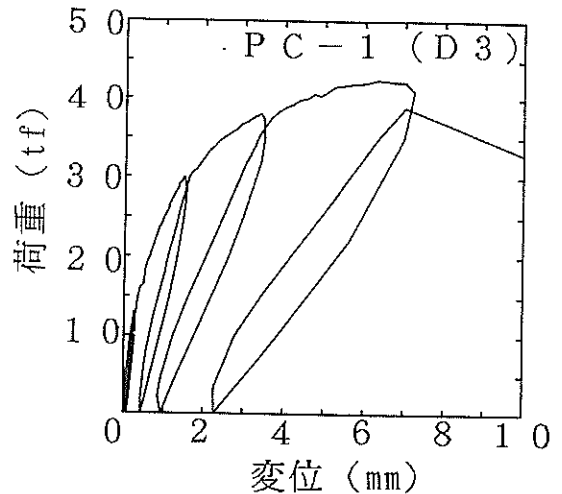


図-20 荷重-変位曲線 (PC:集中荷重載荷)

表-6 試験結果

載荷方法		集中荷重載荷試験		等分布荷重載荷試験		
試験体名		RC-1	PC-1	RC-2	PC-2	
試験体構造		RC構造	PC構造	RC構造	PC構造	
載荷サイクル	1 ひびわれ荷重	6.0 tf	13.0 tf	2.2kgf/cm <sup>2</sup>	4.4kgf/cm <sup>2</sup>	
	2 降伏荷重(1δ)	32.5 tf	38.0 tf	5.6kgf/cm <sup>2</sup>	5.7kgf/cm <sup>2</sup>	
	3	1.5δ	35.7 tf	40.2 tf	6.2kgf/cm <sup>2</sup>	6.5kgf/cm <sup>2</sup>
		2.0δ	-	42.2 tf	6.8kgf/cm <sup>2</sup>	7.1kgf/cm <sup>2</sup>
		3.0δ	-	-	6.9kgf/cm <sup>2</sup>	7.6kgf/cm <sup>2</sup>
	4 最終荷重	30.0 tf	38.9 tf	7.0kgf/cm <sup>2</sup>	8.0kgf/cm <sup>2</sup>	

(-は計測なし)



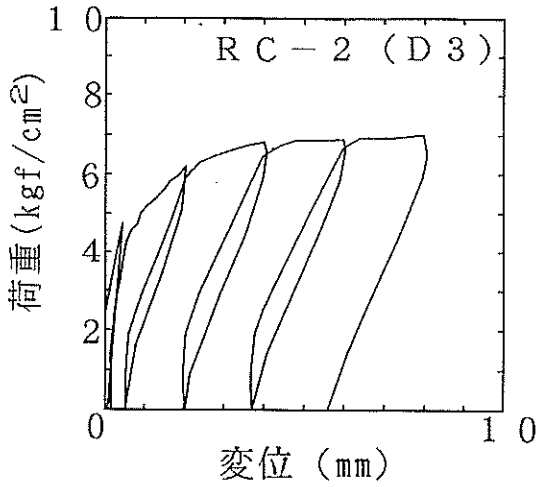


図-21 荷重-変位曲線 (RC:等分布荷重載荷)

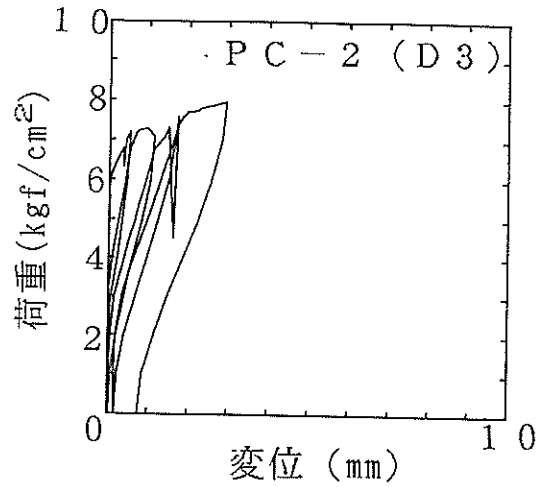


図-22 荷重-変位曲線 (PC:等分布荷重載荷)

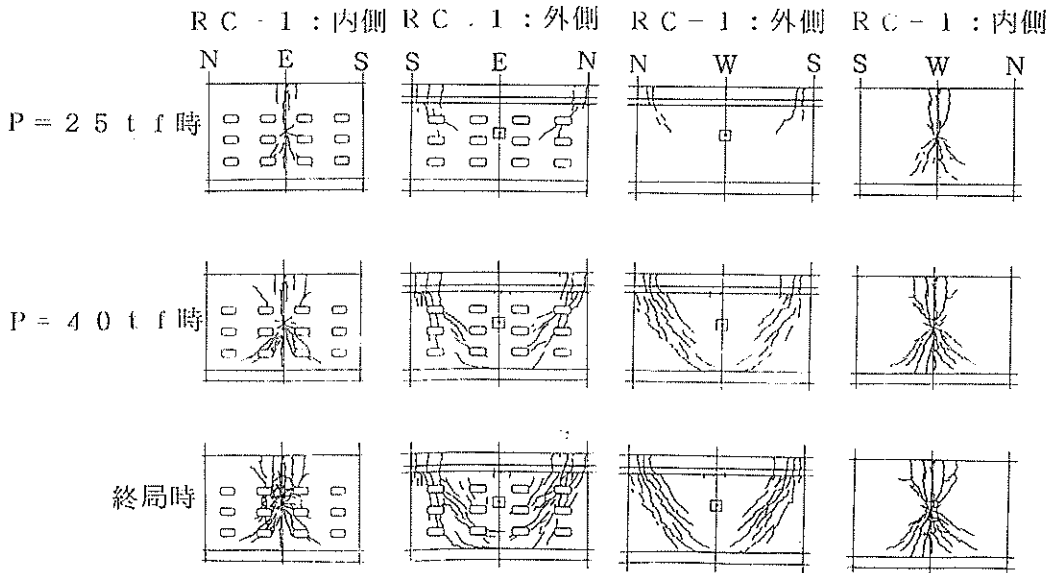


図-23 ひびわれ発生状況 (集中荷重載荷)

図-23に集中荷重載荷での RC 試験体のひびわれの発生状況を示す。またこのひびわれ状況を写真-3に示す。集中荷重下における円筒壁外面のひびわれは、外形図(図-7および図-8)に示す E-W 断面を軸にして線対称状に生じた。RC 試験体では 6.0tf、PC 試験体では 13.0tf の時点で初期ひびわれが発生した。円筒壁外面のひびわれは、両試験体とも N-S 断面上端付近の鉢巻き部から発生し、E-W 断面下端に向かって伸びていった。初期ひびわれの発達とともに、ほぼ平行して両側から 1~2 本ずつひびわれが発生した。この両側に発生したひびわれの間隔は左右ほぼ等間隔で、RC 試験体では

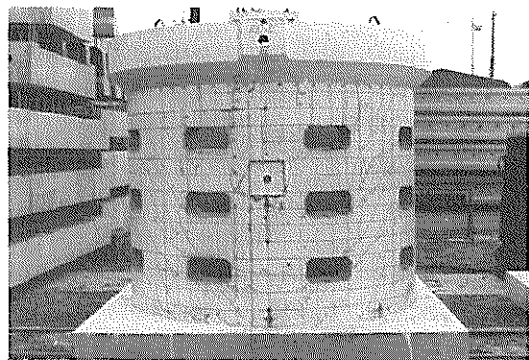


写真-3 破壊状況 (集中荷重載荷)

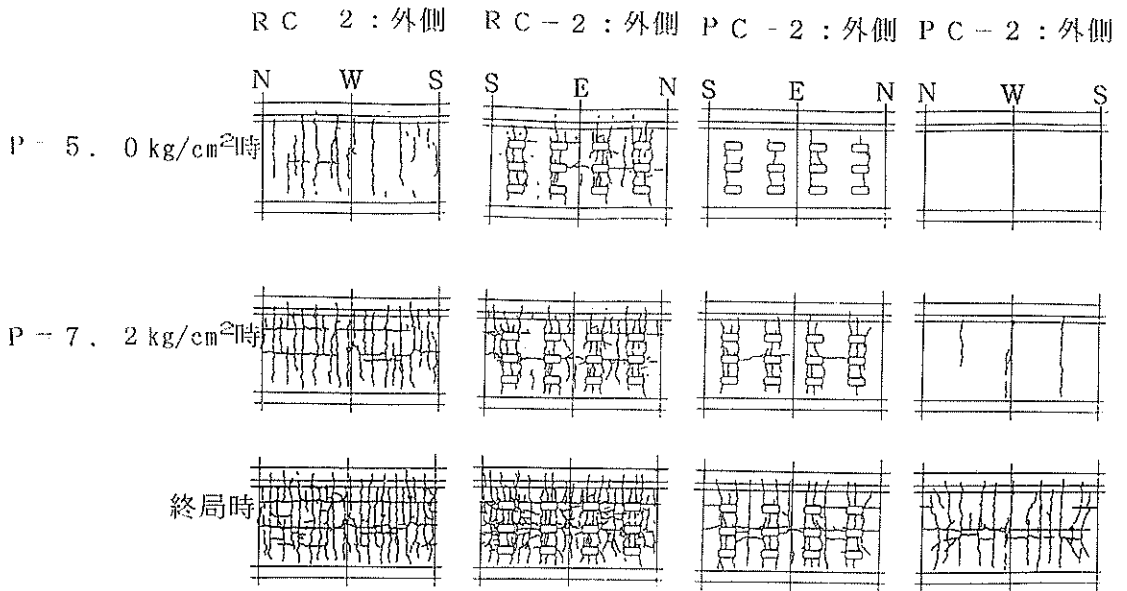


図-24 ひびわれ発生状況(等分布荷重載荷)

約10cm, PC試験体では約12cmであった。これらは、最終的に3~5本ずつの支配的なひびわれとなって載荷点下端に斜方向に進展した。一方、円筒壁内側のひびわれは、載荷点に鉛直方向にまず生じ次第に放射状に多数のひびわれが進展した。ひびわれ性状からのひびわれは、曲げによるものと考えられた。終局的には、開口の存在する側の載荷点において、押し抜きせん断破壊が起こった。集中荷重を受けるRC試験体とPC試験体との比較ではひびわれ性状(ひびわれの発生および破壊状況)に大きな違いはみられなかった。

図-24に等分布荷重載荷におけるひびわれの発生状況を示す。また写真-4にこのときのひびわれ状況を示す。ひびわれは、まず円筒壁の中央付近から鉛直方向に発生し、上端と下端に向かって成長していった。終局時までには発生した支配的な鉛直方向ひびわれは、RC試験体では10~20cmの間隔で43本、PC試験体では20~30cmの間隔で26本であった。

2サイクル目から、鉛直方向ひびわれに加えて円周方向にもひびわれが発生した。最初の円周方向ひびわれはRC試験体、PC試験体ともに円筒壁の下端から約80cmの所に1本発生した。その後、初期円周方向ひびわれの上側と下側とに新たに1本ずつ円周方向ひびわれが発生した。このひびわれは、RC試験体とPC試験体とでは発生した位置がほぼ同じであった。載荷治具の関係上、載荷中に円筒壁の内面のひびわれを試験中に調べることができなかったので、試験終了後に調査を行った。この結果、外面のひびわれに比べて内面のひびわれは、あま

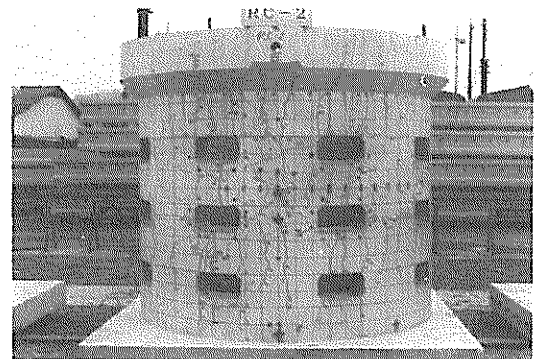


写真-4 破壊状況(等分布荷重載荷)

り進展せず長さが短かったが、本数および発生位置はほぼ同じであり断面を貫通していた。これら鉛直方向のひびわれは、円周方向の円筒壁の伸びによるもの、また水平方向のひびわれは、鉛直方向の曲げによるものと考えられた。

集中荷重載荷試験における開口の影響について述べる。RC試験体、PC試験体とも開口の隅にひびわれが集中する傾向は若干みられた。ただし、ひびわれ性状からみればその傾向は小さかった。また開口の有る側と無い側でのひびわれの状況は、ほぼ同じであり開口の影響はほとんどなかったと言える。

等分布荷重載荷での開口の影響について述べる。開口の存在しない側における鉛直方向ひびわれについては、ほぼ等間隔に発生し、間隔はそれぞれRC試験体が約14cm、PC試験体が約24cmであった。一方、開口の

存在する側での鉛直方向ひびわれ本数は、開口の存在しない側とほぼ同じであったが、RC試験体、PC試験体ともに、開口により断面欠損した部分にひびわれが集中する傾向が若干みられた。集中のみられた部分でのひびわれ間隔は、RC試験体が約10cm、PC試験体が約14cmであり間隔が狭かった。ただし開口の4隅からひびわれが集中して発生することはなかった。等分布荷重載荷でも、ひびわれ性状について、若干開口の影響があったが、顕著な差は見られなかったと言える。

#### 4.2 変形状況

図-25に、図-18で示した $D_1 \sim D_5$ および $D_{11} \sim D_{15}$ の変位計で得られた各試験体の変形図を示す。ここでは、円筒壁上部に取付けた大変位計と $D_5$ および $D_{15}$ の変位計との間に生じた変形量の差で補正して各変位量を算定した。外形図(図-7および図-8)に示したE-W断面での下端から上端にかけての変形は、集中荷重載荷試験では円筒壁の内側に生じた。この分布形は、底板から載荷点、載荷点から上端の間でそれぞれ直線的であり載荷点付近が最も大きな変位となった。図には示していないが、S-N断面では、円筒壁は外側に変形した。RC試験体とPC試験体とで変形状況の差は、ほとんど見られなかった。

次に等分布荷重載荷での変形について述べる。下端から上端にかけての変形は、どの断面においても円筒壁の中央部が外側に膨らむ状態となった。集中荷重載荷における開口の影響を、鋼材降伏時までの開口の有る側と無い側での載荷点における水平方向変位の比較によって調

べた。この結果、開口の存在する側の変位は、存在しない側に比べて、RC試験体で約15%、PC試験体で約10%ほど値が大きかった。したがって、集中荷重載荷試験において、開口率10%程度の開口の存在は、変形に大きな影響を与えなかったと言える。

等分布荷重載荷における開口の影響は、同じ高さにおける変位の比較によって行った。RC試験体では、開口の存在する側と存在しない側との差が鋼材降伏時まではさほど無かったが、降伏後は、存在する側が存在しない側の約2倍ほど大きな変位を示した。一方、PC試験体では、両者の差は特にみられず、開口の影響は顕著でなかった。これはプレストレスの導入による効果と思われる。

#### 4.3 鋼材のひずみ

図-26に集中荷重載荷の鉄筋に生じたひずみの分布を示す。この分布は、RC試験体の円周方向鉄筋に貼られたひずみゲージで得られたものである。同図で分かるように円周方向ひずみは、E-W断面の載荷点の近傍に大きな値が生じ、載荷点から少し離れるとひずみの値は小さかった。

載荷点近傍でのひずみは、内側が引張(+)で外側が圧縮(-)の状態であるので曲げが卓越していたことになる。図-27に鉛直方向の鉄筋に生じたひずみの分布を示す。鉛直方向のひずみは、載荷点下端の円筒壁基部に大きな値が生じた。この基部では、曲げひずみとなっていた。全般的に円筒壁中央部分は、小さな値のひずみしか生じていなかった。また集中荷重載荷時のPC試験

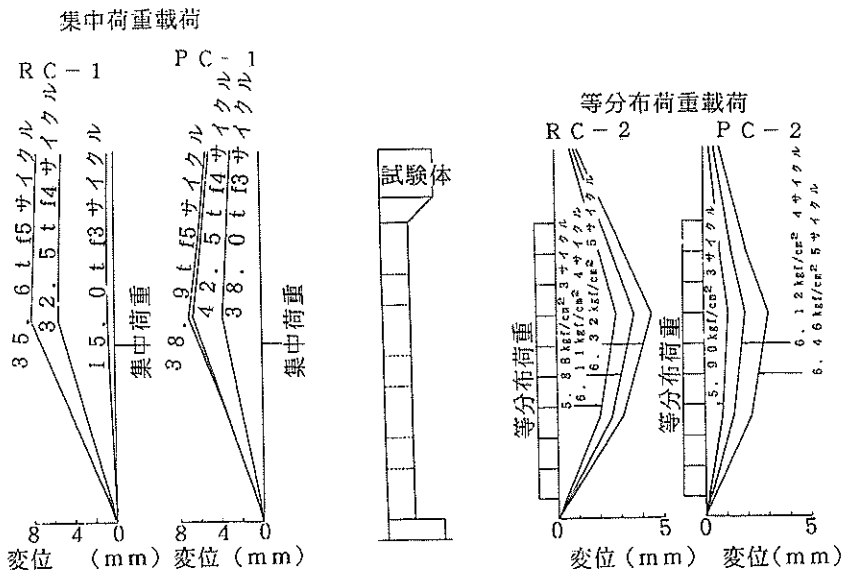


図-25 各試験体の変形状況 (E-W断面)

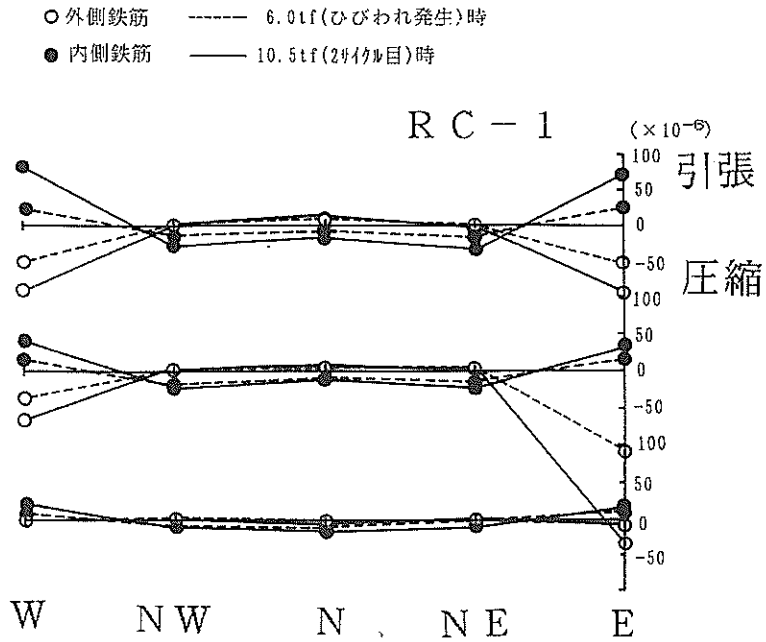


図-26 集中荷重載荷の鉄筋ひずみ分布 (円周方向)

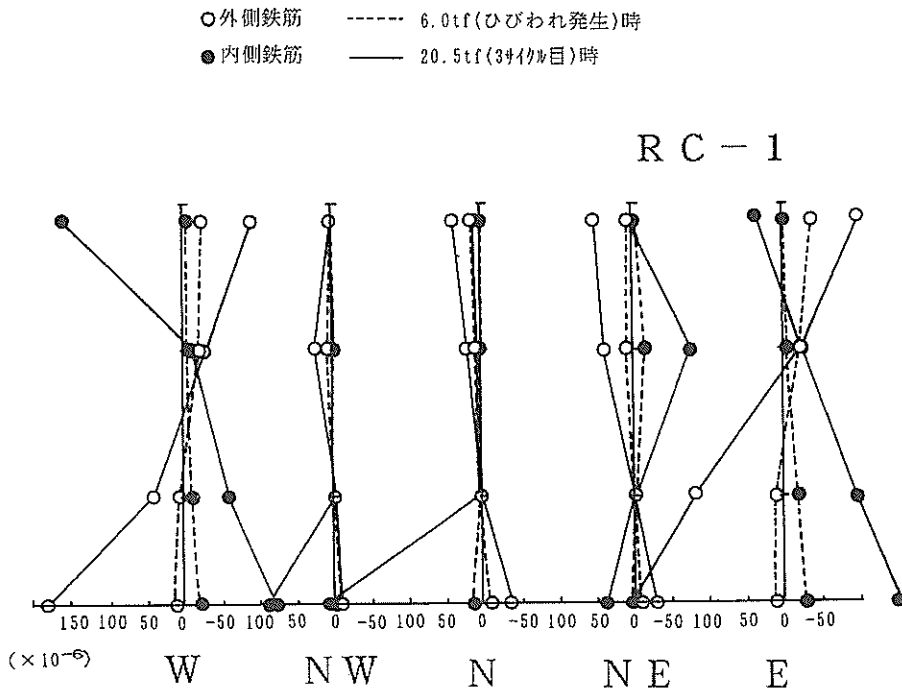


図-27 集中荷重載荷の鉄筋ひずみ分布 (鉛直方向)

体でのひずみの状況は、ほぼ RC 試験体と同じであった。

次に、等分布荷重載荷時の鉄筋ひずみについて述べる。図-28 に円筒壁の中央部分の円周方向の鉄筋のひずみの分布を示す。RC 試験体および PC 試験体とも円周方

向には、ほぼ一様なひずみ量が生じていた。また内側と外側の鉄筋に共に引張ひずみが卓越しており、円周方向に軸引張力が生じていたことを示している。図-29 に RC 試験体での鉛直方向の鉄筋のひずみ分布を示す。円

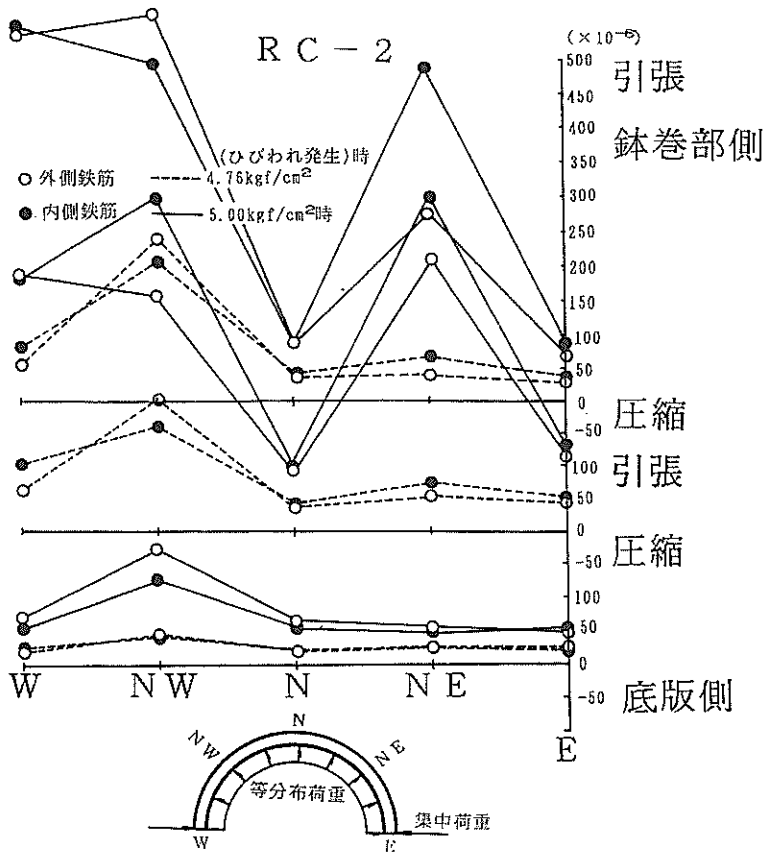


図-28 等分布荷重載荷の鉄筋ひずみ分布 (円周方向)

○ 外側鉄筋    ----- 4.76kgf/cm<sup>2</sup>(ひびわれ発生)時  
● 内側鉄筋    ———— 5.00kgf/cm<sup>2</sup>時

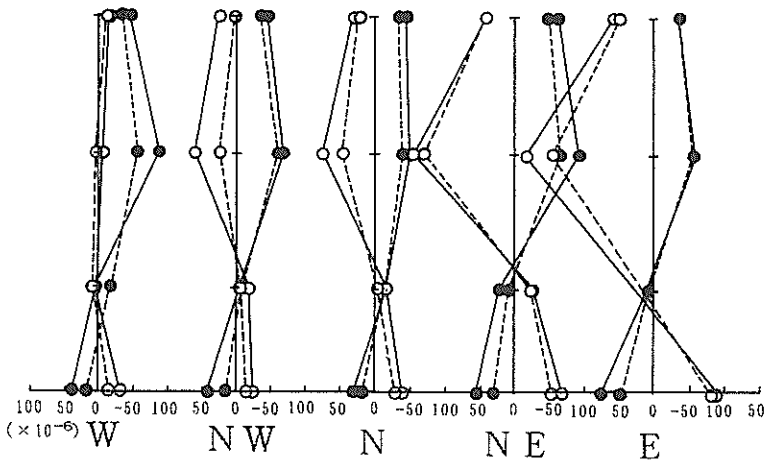


図-29 等分布荷重載荷の鉄筋ひずみ分布 (鉛直方向)

筒壁中央部に大きなひずみが生じたが、この位置では内側鉄筋に圧縮、外側鉄筋に引張と曲げが卓越した。円筒壁基部には、中央部とは、符号が逆の曲げが生じていた。開口の有る側と無い側とでは、図-26 などで分かる

ように若干開口側 (E側) の方がひずみ量が大きかったと言える。

そこで円周方向の鉄筋のひずみを開口側と無い側とで平均して比較した。図-30 に RC 試験体での等分布荷

重載荷のときの両者の比較を示す。開口側の方が、ひずみの荷重に対する増加量は、大きかったが、荷重が  $5 \text{ kgf/cm}^2$  までは、ほぼ両者が同じ値であった。終局に近づくにつれてひずみ量に差が生じた。しかし設計で想定する許容ひずみ量内では、大きな差はなかったと言える。

#### 4.4 コンクリートのひずみ

コンクリートのひずみは、計測精度上ひびわれが入る前しか信頼できない。また円筒壁の外側のコンクリートひずみを計測しかつ計測点数も多くはないことから、ここでは得られたコンクリートひずみの概略のみ述べる。集中荷重載荷試験体での鉛直方向のコンクリートひずみは、載荷点下端の円筒壁基部で大きな引張の値を示した。この鉛直方向ひずみは、載荷点より離れるにしたがって値が減少し、載荷点と直角方向すなわち N-S 断面の下端では圧縮ひずみであった。円周方向のひずみは、載荷点の近傍に大きな圧縮の値が生じたが、他の箇所ではほとんどひずみが生じなかった。

等分布荷重載荷試験体では、円筒壁中央部分の円周方向に大きな値の引張ひずみが生じた。円筒壁下端では円周方向ひずみは小さな値であった、一方鉛直方向のひずみは、円筒壁下端で大きな圧縮ひずみが生じ、円筒壁中央部分では小さな値であった。

図-31 に載荷荷重とコンクリートの平均ひずみとの関係を示す。コンクリート表面に一列に並べたパイ型ひずみゲージにより計測された結果を開口の有る側と無い

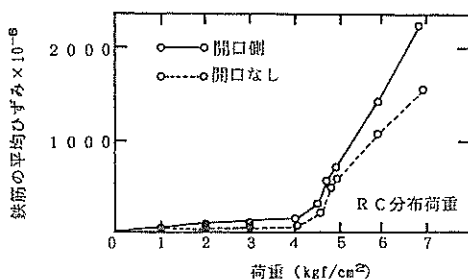


図-30 荷重と鉄筋の平均ひずみ

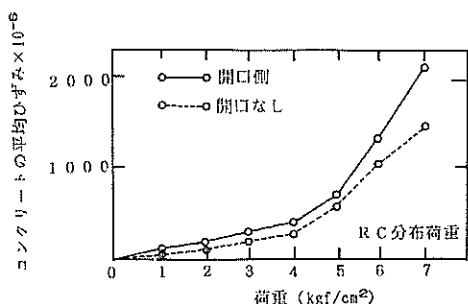


図-31 荷重とコンクリートの平均ひずみ

側とに分けて整理したものである。開口側の方が無い側よりもひずみ量は、大きかった。図-31 に示される結果は、図-30 に示される結果とほぼ同じであった。

以上述べたコンクリートひずみの性状は、鉄筋ひずみゲージから得られたものと同じであった。

また底板のコンクリートには、載荷試験中にほとんどひずみが生じなかった。

#### 4.5 ひびわれ幅

図-32 に集中荷重載荷での RC-1 試験体のひびわれ幅と載荷荷重との関係を示す。図中のひびわれ幅は、パイ型ゲージでの取得されたものである。図中の (a) は、開口の隅で (b) は円筒壁の開口側のはほぼ中央位置 (c) は開口の無い側でそれぞれ得られた荷重とひびわれ幅との

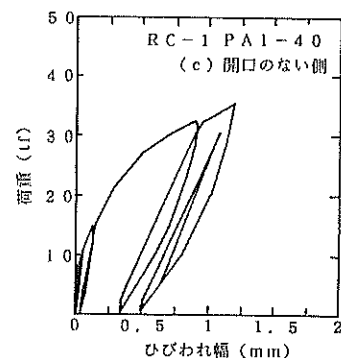
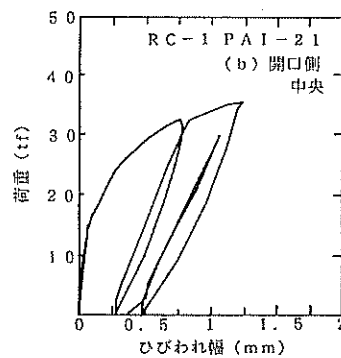
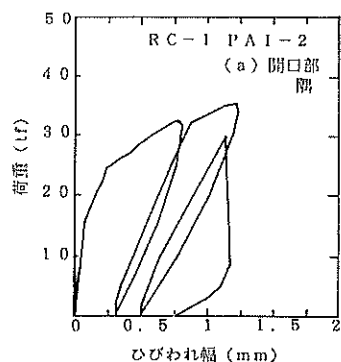


図-32 RC-1 における荷重とひびわれ幅との関係

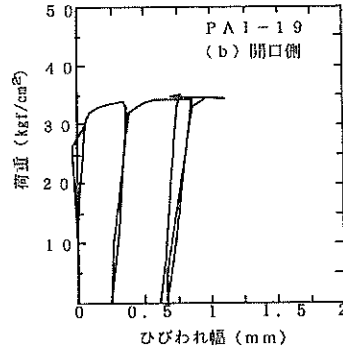
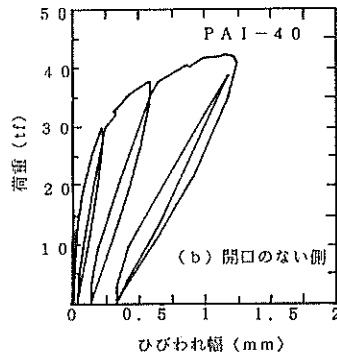
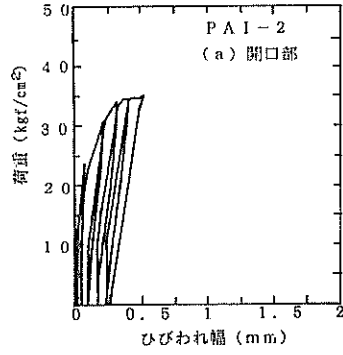
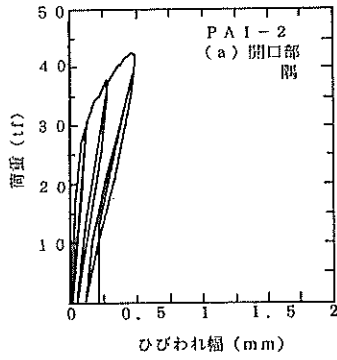


図-33 PC-1における荷重とひびわれ幅との関係

図-34 RC-2における荷重とひびわれ幅との関係

関係である。ひびわれ発生後、荷重の増加にともないひびわれ幅は大きくなった。海洋環境下でのひびわれ幅の一応の制限値として0.2mmを想定するとほぼ20tfの載荷荷重のときにこの値に達していた。しかし、図に示す3箇所での荷重とひびわれ幅の関係はお互いに類似していた。このことは、開口の4隅で特にひびわれ幅が増大しなかったことを示している。

図-33にPC-1試験体でのひびわれ幅と載荷荷重との関係を示す。PC試験体では、プレストレスの導入により一般的にひびわれの発生が押えられる。0.2mmのひびわれ幅に達するまでの載荷荷重は、約30tfであった。RC-1試験体と同様に開口の4隅でのひびわれ幅は、急増しなかった。開口周辺でもプレストレスが想定したとおり導入されていたと言える。

図-34にRC-2試験体でのひびわれ幅と載荷荷重との関係を示す。等分布荷重載荷では、円筒部に軸引張力が卓越することからひびわれが一旦生じるとひびわれ幅が急増する傾向がある。この傾向は、図中の(b)に示すように今回の試験体でも見られた。また開口の4隅では、必ずしもひびわれ幅が急増する傾向が見られなかった。これは、開口の4隅では応力の乱れから必ずしも軸引張力が卓越してなかったことを示している。図-35

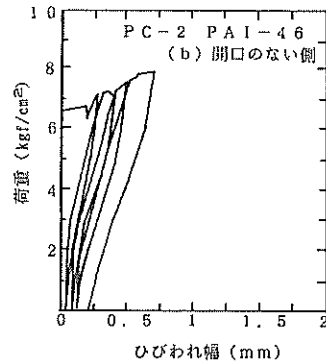
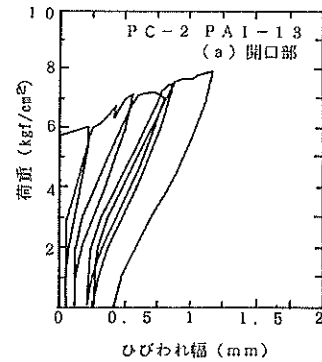
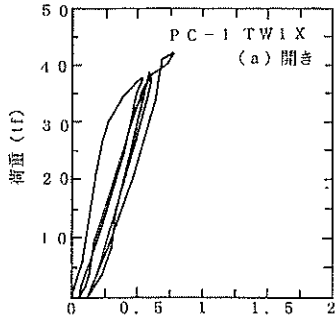
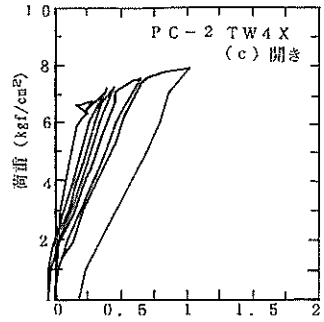


図-35 PC-2における荷重とひびわれ幅との関係

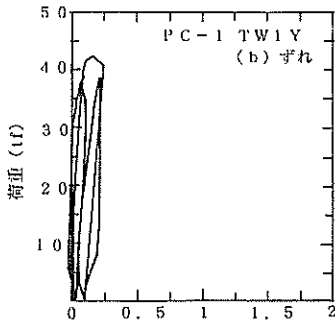




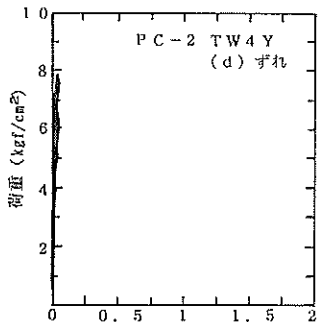
(a) ひびわれ幅 (mm)



(c) ひびわれ幅 (mm)

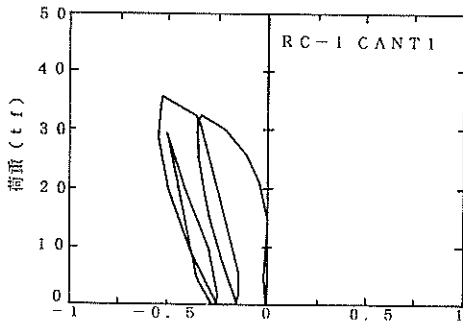


(b) ひびわれ幅 (mm)

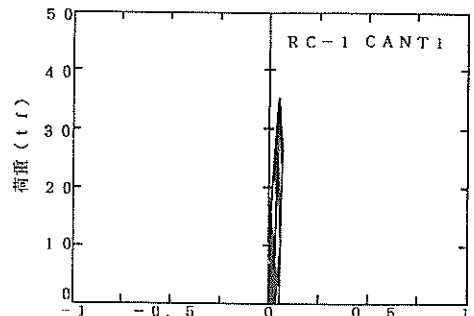


(d) ひびわれ幅 (mm)

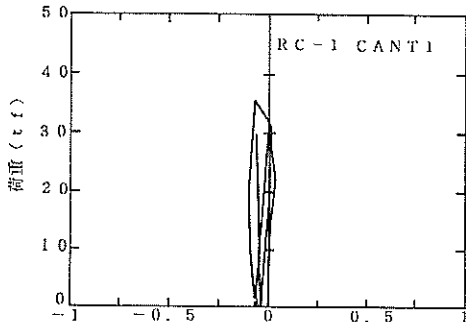
図-36 2軸型亀裂変位計による荷重とひびわれ幅との関係



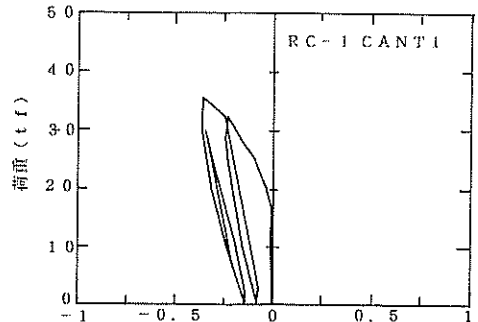
(a) ひびわれ幅 (mm)



(c) ひびわれ幅 (mm)



(b) ひびわれ幅 (mm)



(d) ひびわれ幅 (mm)

図-37 カレンチレバー型変位計による荷重とひびわれ幅との関係

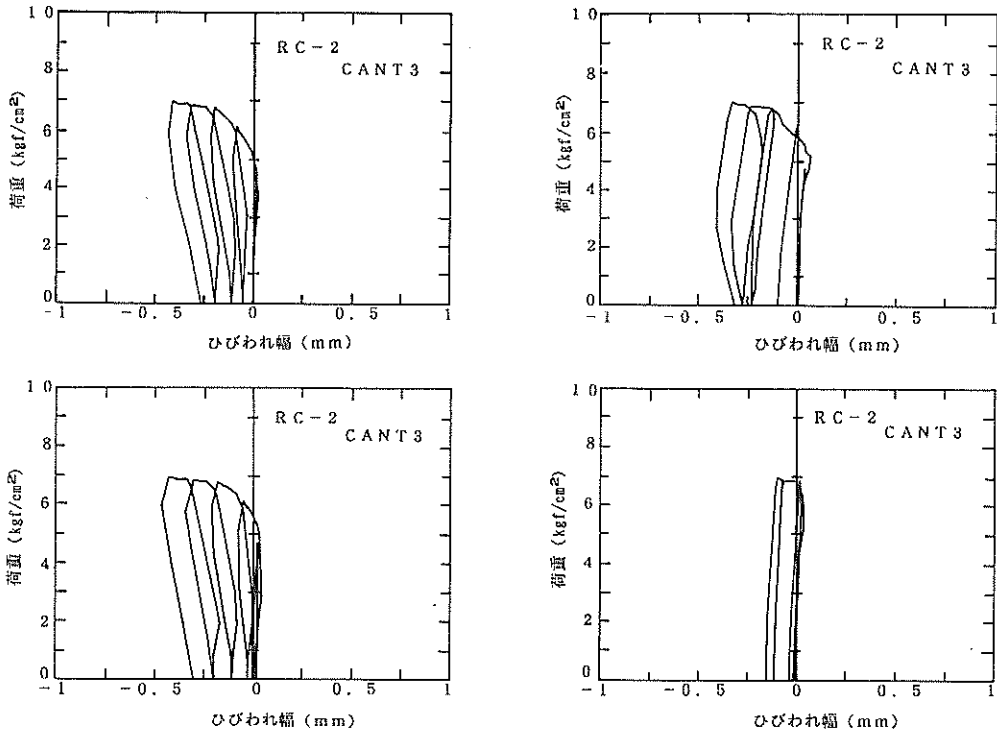


図-38 カレンチレバー型変位計による荷重とひびわれ幅との関係

に PC-2 試験体でのひびわれ幅と載荷荷重との関係を示す。RC-2 試験体と同様にひびわれ幅は、ひびわれが入ると急増した。ここでは、開口側のひびわれ幅が開口の無い側より大きかった。

図-36 に PC-1 および PC-2 試験体での 2 軸型亀裂変位計による荷重とひびわれ幅を示す。この変位計は、初期ひびわれが発生した開口部の箇所にひびわれをはさんで設置した。図-36 の (a) および (b) は、PC-1 の試験体の開口部での荷重とひびわれ幅との関係である。(a) 図は、ひびわれの開き (ひびわれ直交方向のひびわれ幅) を (b) 図は、ずれ (ひびわれ平行方向のひびわれ幅) を示している。ひびわれの開きに対して約  $1/3$  のずれが生じていた。開口部には、かなりのせん断力が生じていたことになる。(c) および (d) は、PC-2 の試験体の開口部での荷重とひびわれ幅との関係である。ひびわれの開きに対してずれは、ほとんど生じておらず引張力が主にひびわれ面に生じていたことが分かる。

図-37 に RC-1 の試験体でのカレンチレバー型変位計による荷重とひびわれ幅との関係を示す。図 (a) および (d) に示すように載荷点下方の基部でひびわれが生じた。しかし載荷点と直交方向の S-N の箇所では、図 (c) に示すようにひびわれは発生しなかった。図-38 に RC-2 の試験体でのカレンチレバー型変位計による

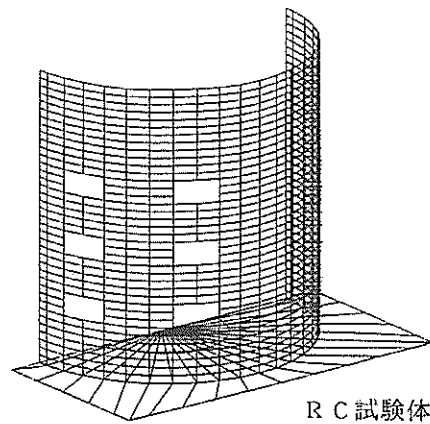


図-39 計算モデル

荷重とひびわれ幅との関係を示すように。この場合には、載荷荷重が  $5 \text{ kgf/cm}^2$  のとき、いずれの箇所にもひびわれが生じていた。

## 5. 有限要素法による計算

### 5.1 計算モデル

載荷試験に用いた試験体を対象として、有限要素法による構造解析を実施した。計算モデルは、対称性を考慮して試験体の  $1/2$  とした。図-39 に示すように、円

筒壁を円周方向に 22 分割，高さ方向に 38 分割した。用いた要素は 4 辺形のシェル要素で，計算モデルの総節点数は 930，総要素数は 866 である。

解析では鉄筋の降伏やコンクリートのひびわれを考慮せず，構成材料を弾性体と仮定した。材料の弾性係数は材料試験結果を基に鋼材とコンクリートとを重ね合わせて  $2.2 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$  とした。また，ポアソン比は 0.2 とした。

今回の解析では，

- ① RC 試験体での弾性域内での載荷試験結果との比較
- ② PC 試験体でのプレストレス導入に伴う 2 次応力の予測

の 2 点を目的とした。

F. E. M. の外力は，なるべく載荷試験の状態を再現するように設定した。集中荷重載荷では，載荷点の位置に相当する要素面に面分布荷重を与えた。等分布荷重載荷では，載荷面に相当する要素面すべて面分布荷重を与えた。PC 試験体でのプレストレス導入に伴う 2 次応力の予測では，従来の設計法の場合でのプレストレス導入手順に近い荷重設定で計算を行った。通常，タンクなどの円筒構造物における検討では，初期引張力から，

- ① 定着具の摩擦
- ② PC 鋼材とシースとの摩擦
- ③ 定着具の取付け
- ④ コンクリートの弾性変形
- ⑤ コンクリートのクリープおよび乾燥収縮
- ⑥ PC 鋼材のリラクゼーション

で生じる諸量を減じて，有効プレストレス力を求める。今回の計算では，この有効プレストレス力を外力として，F. E. M. 解析を行なう。今回行った解析では，鋼材に PC 鋼棒を使用したこと，およびコンクリート打設後 2～3 週間で試験を行なったことから，考慮する減少量は PC 鋼棒とシースとの摩擦およびコンクリートの弾性変形の 2 項目のみとした。また，PC 鋼棒の配置されている位置に相当する各節点に，式 (5) および式 (6) を用いて算出したプレストレス力を節点荷重として与えた。図-40 に二次応力解析に使用した荷重設定状況を示す。円筒壁鉛直方向および底版は，端部の節点に集中荷重として与えた。円筒壁の円周方向には，有効プレストレスを一樣荷重に換算した後，円筒壁外側から節点荷重として与えた。

## 5.2 計算結果

### (1) 載荷試験の解析

集中荷重載荷での RC 試験体の変形状況の計算結果

を図-41 に示す。変形の状況は，載荷点の付近で円筒壁内側に大きく窪んでおり，載荷点より 90 度回転した箇所では，外側にはらみだした。開口の存在する側の載荷点位置の水平変位は，存在しない側より 1 割ほど大きな値を算定した。また，等分布荷重載荷での試験体の変形状況を図-42 に示す。等分布荷重載荷では円筒壁の中央部が全体に外側に膨れだす変形状況が算定された。

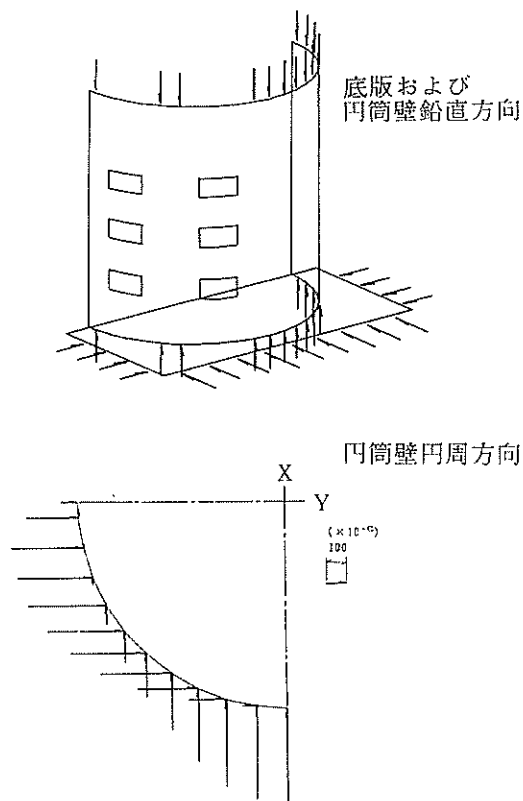


図-40 プレストレス導入節点モデル

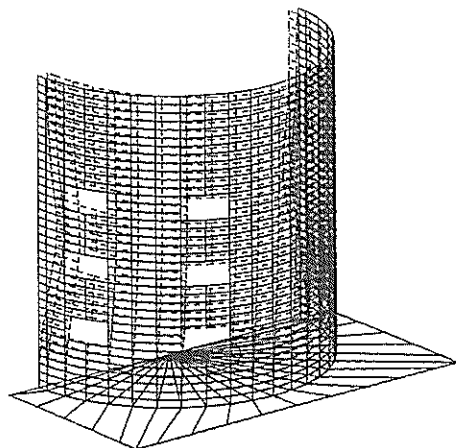


図-41 変形状況の計算値（集中荷重載荷）

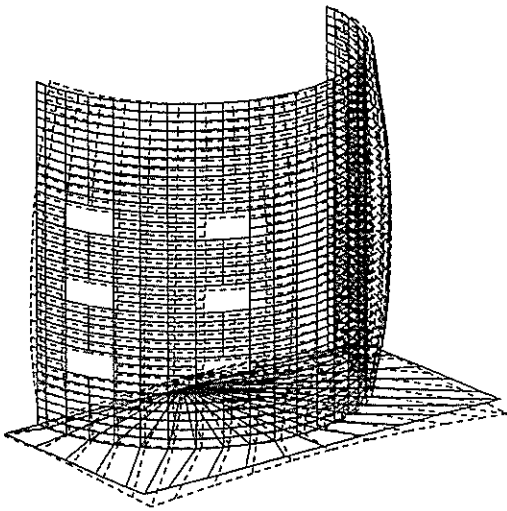


図-42 変形状況の計算値（等分布荷重載荷）

しかし、円筒壁上部では、鉢巻きの影響で円筒壁の内側への変位が算定された。計算では、開口の存在する側で、変形が増大する現象は顕著でなかった。これらの計算による変形状況は、試験結果と良く一致した。

集中荷重を載荷した場合の試験体の円周方向の曲げモーメント分布を図-43に、鉛直方向の曲げモーメントの分布を図-44に示す。円周方向の曲げモーメントは、載荷点の付近で若干大きくなったが、円筒壁上部の鉢巻きの部分でさらに大きな値が算定された。これは、前述のように、鉢巻きが試験体の上部の変形をかなり拘束するためである。円周方向の曲げモーメントは、載荷点より約45度離れた筒所で符号が変る分布となった。一方、高さ方向の曲げモーメントは、載荷点付近で最も大きくなり、円筒壁の下端の底版との接合部付近で若干大きい値が算定された。図-45に主応力 ( $\sigma_1$ ) を示す。同図

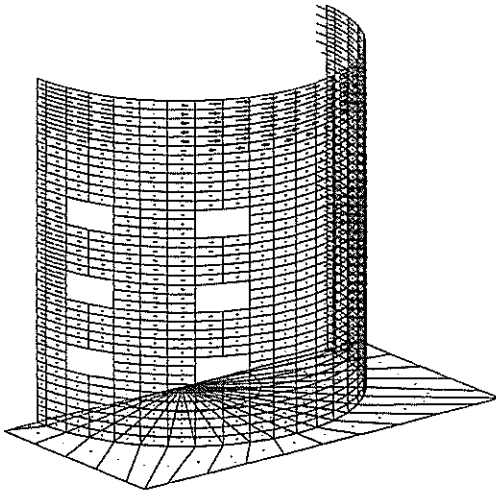


図-43 円周方向の曲げモーメント（集中荷重載荷）

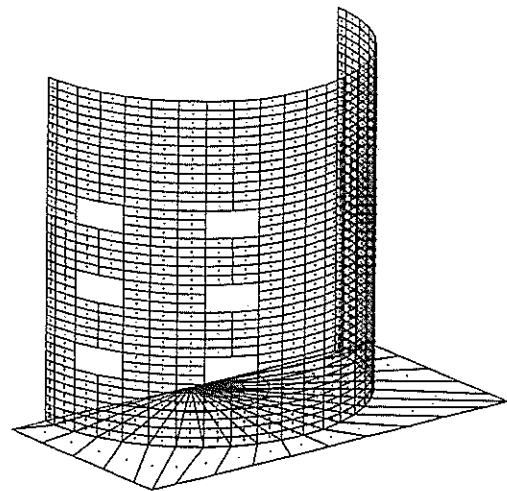
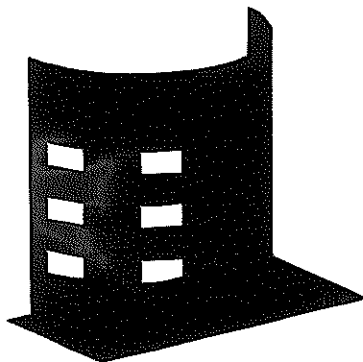
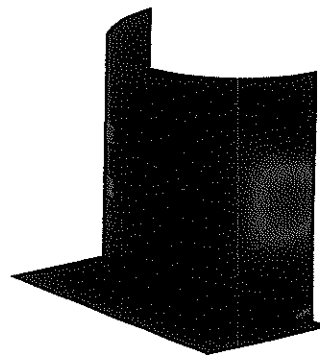


図-44 鉛直方向曲げモーメントの計算値（集中荷重載荷）



（開口側）



（開口のない側）

図-45 RC-1での主応力の分布

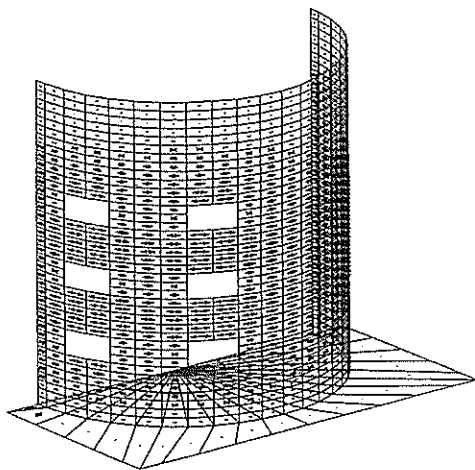


図-46 円周方向軸力の計算値 (等分布荷重載荷)

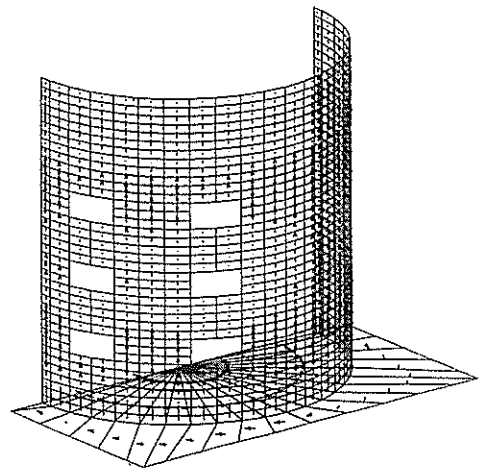
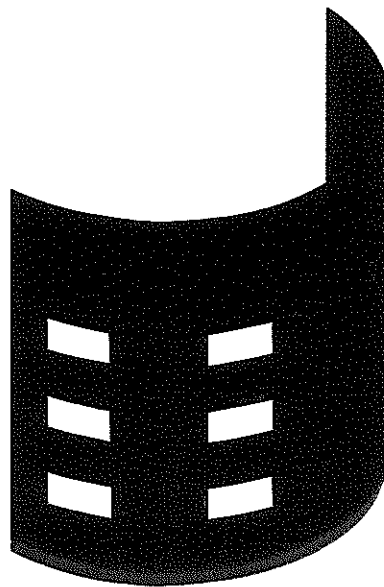


図-47 鉛直方向曲げモーメントの計算値 (等分布荷重載荷)

PRESS RETURN TO CONTINUE



M-Y



P C 導入  
底版

図-48 底版導入時の鉛直曲げモーメントの分布

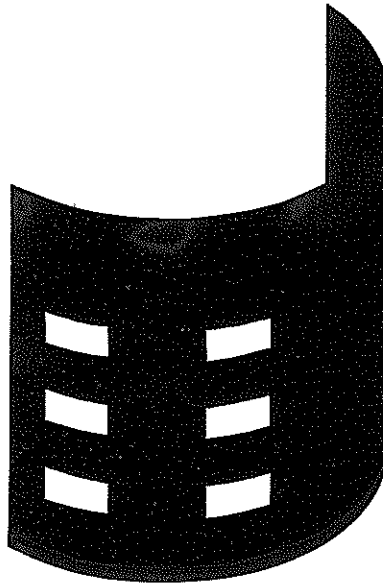
で赤の部分が応力の大きい箇所、青の部分が小さな箇所を示す。この応力は、載荷点位置に集中していることが分かる。これらの計算結果から、集中荷重を受けた場合の試験体の破壊は載荷付近に限定され、かつ円周および鉛直方向の曲げによりコンクリートにひびわれが生じて破壊が進展することが予想される。

等分布荷重を載荷した場合の試験体の円周方向の軸力の分布を図-46に示す。円周方向の軸力は円筒壁にはほぼ均一に引張力として算定された。特に、開口の存在す

る側では、開口間で帯状に応力が流れている結果となった。開口によって不連続となっている部分では、これらの帯からの応力が伝達し、若干の応力が算定される結果となった。

また、等分布荷重を載荷した場合の試験体の鉛直方向の曲げモーメントの分布を図-47に示す。鉛直方向の曲げモーメントの値は、下段の開口および上段の開口付近の高さで大きく不連続の状態であった。一方、開口の存在しない側では、下端から上端にかけて連続して大き

PRESS RETURN TO CONTINUE

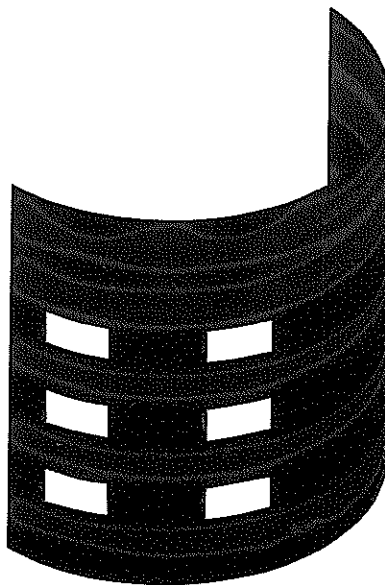


M-Y

P C 導入  
底版+鉛直

図-49 円筒壁鉛直方向導入時の鉛直曲げモーメントの分布

PRESS RETURN TO CONTINUE



M-Y

P C 導入  
最終

図-50 最終時の鉛直曲げモーメントの分布

な値が算定された。これらのことから、等分布荷重を載荷した場合には、円筒壁に発生する円周方向の軸引張力ならびに鉛直方向の曲げモーメントによる破壊が進展す

ることが予想される。

(2) プレストレスの導入の解析

円筒壁にプレストレスを導入する手順にしたがってF.

PRESS RETURN TO CONTINUE



S-Y

$\sigma_{\mu} P C$  導入  
 底板+鉛直

図-51 PC導入による鉛直応力の状況

E. M. で計算した結果を図-48から図-50までに示す。図-48は、底板にプレストレスを導入したときの円筒壁の鉛直方向の曲げモーメントを示している。底板に導入したとき、円筒壁の下端に大きな曲げモーメントが計算される。この曲げモーメントによる応力を2次応力と呼ぶが、コンクリートの引張強度以上の二次応力が与えられるとひびわれが発生する。今回のケースでは、円筒壁下端に  $5.1 \text{ kgf/cm}^2$  の圧縮応力が計算された。図-49は、鉛直方向に導入したときの鉛直方向の曲げモーメントを示す。このときも円筒壁下端に曲げモーメントが集中した。このとき下端で、 $21.1 \text{ kgf/cm}^2$  の圧縮応力となった。図-50に円周方向に導入したときの曲げモーメントを示す。このとき円周方向に開口の無い箇所に帯状に大きな曲げモーメントが計算された。円筒壁下端には、逆にわずかながらではあるが引張応力が計算された。図-51に最終状態での鉛直方向の応力度の分布を示す。円筒壁全体にプレストレスが導入されている状況が分かる。しかし、開口部の下端、円筒壁の下端および鉢巻き部など局所的に、十分なプレストレスが導入されていない。以上述べたように部材単位でなく構造系全体でプレストレスの導入状況を F. E. M. で検討できる。

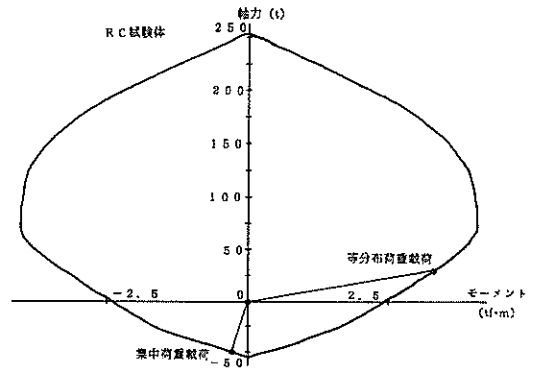


図-52 RC試験体でのモーメント軸力との関係

## 6. 円筒壁の力学性状の考察

### 6.1 耐荷力

F. E. M. で得られた断面力の計算結果を用いて、式(2)より算定した各荷重段階における曲げ耐荷力を表-7に示す。ここで計算された耐荷力は有限要素法で求めたモーメントと軸力との相関図を作成して得たものである。図-52にRC試験体の円筒壁部材での相関図を示す。表-7に示すように曲げ耐荷力に関して全般的に試験値の方が計算値より大きめとなった。

集中荷重載荷試験については、最終的には押し抜きせん断破壊が生じ、計算値での破壊形態が違った。

写真-5にPC試験体での押し抜きせん断破壊の状況



を示す。この試験体では、載荷が42.2tfのとき、開口の存在する側での載荷点位置で押し抜きせん断によって終局に至った。式(3)を用いて開口の無い板として押し

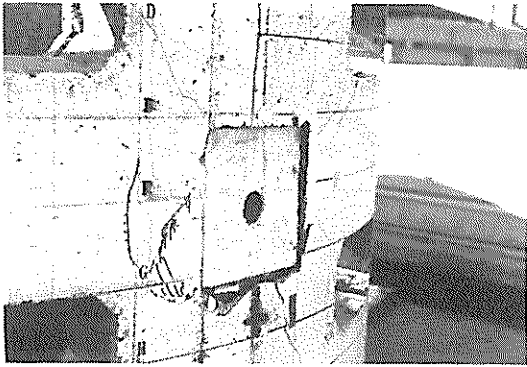


写真-5 押し抜きせん断破壊

抜きせん断耐力を計算すると21tfであり、図-6を参考に開口の影響を考慮して求めると、試験体の押し抜きせん断耐力は13tfであった。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%しか検討断面の周長( $u_p$ )が有効でなかった。このように計算値と試験結果との差は大きかった。この原因として、円筒壁の曲率と開口の補強とが考えられる。円筒壁では、図-53に示すように載荷板直下のコンクリートの圧縮領域が平面部材での領域と比べて広がる。すなわち曲率の影響で中立軸が下方へ移動する。載荷試験での押し抜きによるひびわれ状況を考慮して $u_p$ を計算すると、考慮しない場合に比べて30%程度長くなった。さらに、 $u_p$ を計算する際、開口を横切らない部分の $u_p$ の低減を行わないとすると35.0tfとなり、試験結果の42.2tfに近ずいた。このように今

表-7 計算値と実測値との比較

試験体番号	ひびわれ荷重		鉄筋降伏荷重		最大荷重	
	計算値	実測値	計算値	実測値	計算値	実測値
RC-1	3.9tf	6.0tf	23.0tf	32.5tf	25.1tf	35.7tf
PC-1	9.8tf	13.5tf	24.1tf	38.0tf	30.4tf	42.2tf
RC-2	1.9kgf/cm <sup>2</sup>	2.2kgf/cm <sup>2</sup>	5.7kgf/cm <sup>2</sup>	5.6kgf/cm <sup>2</sup>	7.7kgf/cm <sup>2</sup>	7.0kgf/cm <sup>2</sup>
PC-2	3.7kgf/cm <sup>2</sup>	4.4kgf/cm <sup>2</sup>	4.9kgf/cm <sup>2</sup>	5.7kgf/cm <sup>2</sup>	6.5kgf/cm <sup>2</sup>	8.0kgf/cm <sup>2</sup>

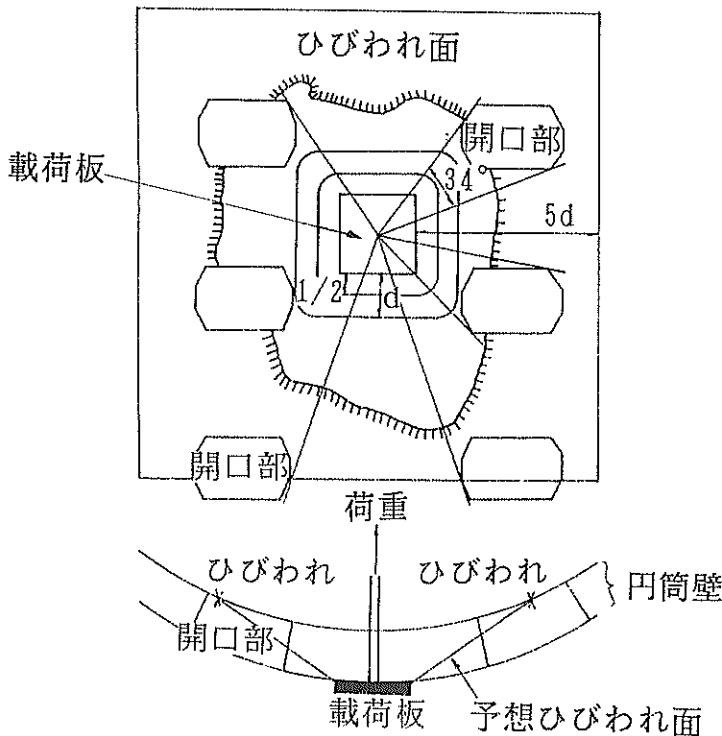


図-53 押し抜きせん断の破壊の状況

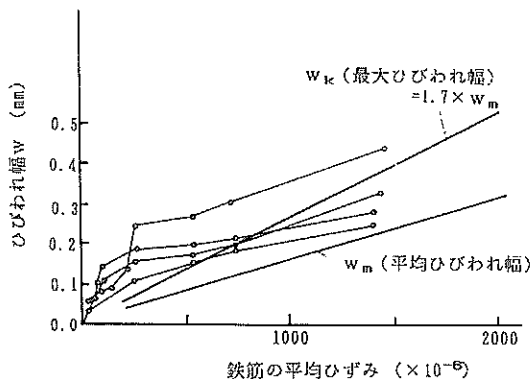


図-54 開口の存在する側におけるひびわれ幅  
-鉄筋平均ひずみの関係

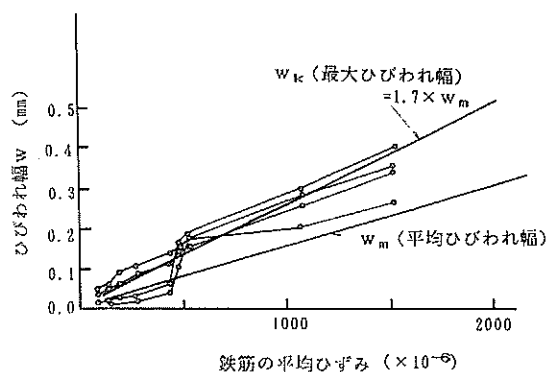


図-55 開口の存在しない側におけるひびわれ幅  
-鉄筋平均ひずみの関係

回の円筒の試験体では、式(3)をそのまま適用できないことが分かった。また開口を十分補強しておけば、開口による低減を5dの範囲内で行なう必要がないと考える。

### 6.2 ひびわれ幅

図-54および図-55にそれぞれ開口の存在する側と存在しない側における、等分布荷重載荷での鉄筋の平均ひずみとひびわれ幅の関係をRC試験体について示す。鉄筋の平均ひずみは、開口側と開口の存在しない側それぞれの円周方向鉄筋に貼ったひずみゲージで得られた値の平均である。内側から等分布荷重を受ける円筒壁では、円周方向に軸引張力が生じ、この引張力によるひびわれが発生する。この状態では、ひびわれの発生した直後からひびわれ幅がかなり大きくなる傾向がみられた。すなわち、開口の存在する側では、鉄筋のひずみが $200 \sim 300 \times 10^{-6}$ のときひびわれ幅が $0.1 \sim 0.2 \text{mm}$ となった。開口の存在しない側でも、鉄筋のひずみが $300 \times 10^{-6}$ 程度のとき $0.2 \text{mm}$ 近いひびわれ幅が生じた。このように鉄筋のひずみが小さいうちからにひびわれ幅が、大きくなる。また、開口側では、ひびわれ幅は式(4)で計算される値と比べてかなり大きな値となった。円筒壁では内側からの荷重に対して、鉄筋ひずみが小さい時点で既にひびわれ幅が許容値に達する可能性が高い。この試験結果は、参考文献(2)で得られたものと同じである。したがって、海洋環境下、特に腐食環境の厳しい飛沫帯などでは、ひびわれの発生を許さない設計法の採用、たとえばプレストレスの導入あるいは鉄筋の許容応力度を低めに設定するなどの対応を行うなどが望ましい。

### 6.3 プレストレスの導入

円筒壁へのプレストレス導入は、底版、円筒壁の鉛直方向、円周方向の手順で行なった。今回の二重円筒ケースンでは、開口の存在、鉢巻きの存在、底版と円筒壁と

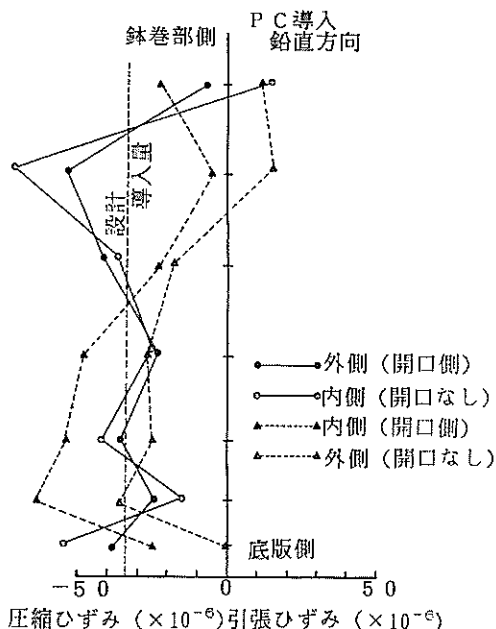


図-56 鉛直方向プレストレス導入後の鉛直方向  
ひずみの分布

が剛結である、などの理由からプレストレスの導入の事前の検討が必要である。図-56に円筒壁の鉛直方向に導入されたプレストレス量の分布の実測値を示す。この値は、コンクリート表面に貼ったコンクリートゲージで計測されたものである。実測値の値は、かなりばらつきが多いが、円筒壁の中央部分には、ほぼ設計どおりのプレストレス量が導入されていた。しかし鉢巻き部と円筒壁下部では、必ずしも十分なプレストレス量が導入されていなかった。一部では、引張のひずみとなっていた。図-57に円周方向のプレストレス量の分布を示す。円周方向でも鉢巻き部および底版との接合付近では予定ど

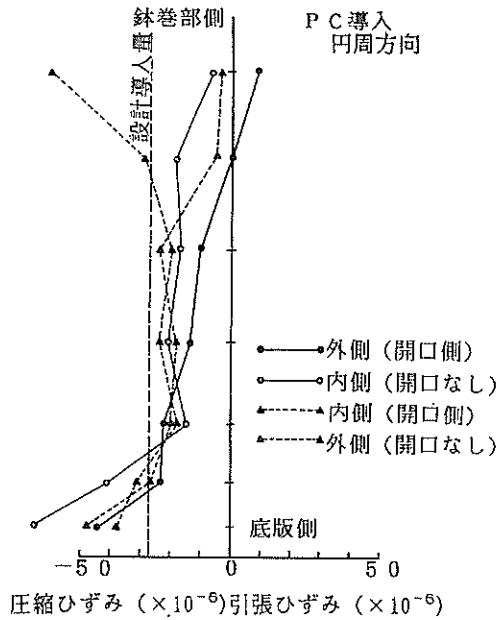


図-57 円周方向プレストレス導入後の円周方向ひずみの分布

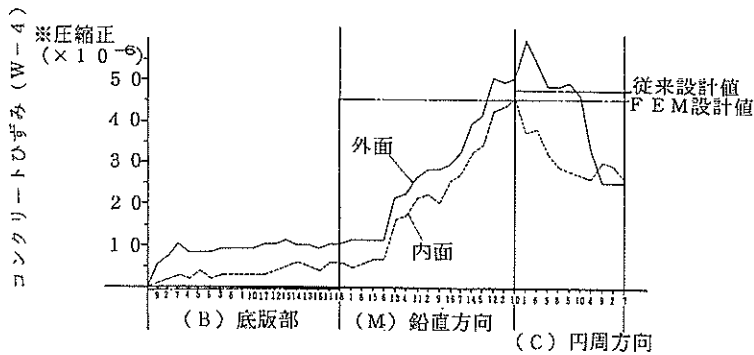


図-58 鉛直方向コンクリートひずみの経時変化

おりのプレストレス量が導入されていなかった。また、軸圧縮力だけでなく曲げも生じた。

このように剛な部材が隣接している場合プレストレスの導入には注意が必要である。

図-58に鉛直方向のコンクリートひずみのプレストレス導入段階ごとの実測値を示す。測定箇所は、円筒壁のほぼ中央部分であるが、鉛直方向のプレストレス導入段階で予定どおりのプレストレス量が導入された。しかし円周方向の導入により鉛直方向のプレストが減少した。このように導入手順によりプレストレス量に変化することにも注意が必要である。プレストレス量の導入の設計では、他部材と接合による変形の拘束や導入手順によるプレストレス量の変化にも配慮すべきである。このためには、部材単位の導入計画をたてるだけでなく、構造物

の全体系を考えたモデルにより検討を行なうのが良い。

## 7. 結論

今回の研究で得られた主要な結論は以下のとおりである。

- ① 多数の開口を有する円筒壁に外側より水平方向に集中荷重載荷を行ったところ、円筒壁のかなり広い範囲に曲げひびわれが生じたが、最終的には載荷点での押し抜きせん断により破壊に至った。また、円筒壁の内側からの等分布荷重載荷では、円筒壁に鉛直方向ひびわれがほぼ等間隔に生じた。このひびわれは、主に円周方向の軸引張力によるもので、最終的にはこの円周方向の軸引張力により外側に膨らみだして、鋼材の降伏により終局に至った。

② 開口が存在する部分では、存在しない部分に比べてひびわれ幅や変形が大きくなる傾向がみられたが、破壊性状、ひびわれ幅、鋼材のひずみなどに大きな差はなかった。また、開口の4隅でひびわれや破壊が著しく集中することはなかった。今回のようにハンチを設けかつ補強鉄筋の配置を行えば、10～20%の開口が円筒壁にとって特に構造的な弱点となることはない。

③ 既往の押し抜きせん断耐力の算定式では、試験値の半分に満たない耐荷力しか与えなかった。円筒壁の外側から集中荷重を載荷するときは、円筒壁の曲率の影響によりせん断検討面の周長が長くなることを考慮する必要がある。また、開口を十分に補強してあるときは、開口の存在による周長の低減をCEB-FIPの算定式のように大きく取る必要がないと考える。

④ 内側から等分布荷重を受ける円筒壁では、円周方向の軸引張力によりひびわれが発生するとひびわれ幅の値が急増するので注意が必要である。特に腐食環境の厳しい飛沫帯付近では、コンクリートにひびわれの発生を許さない設計をするのが良い。

⑤ 円筒壁にプレストレスを導入する場合には、導入の手順と導入量の管理を事前に良く検討して、二次応力によるひびわれの発生を抑えることが重要である。また、導入の方法によっては、既に導入されたプレストレスが次の導入ステップで低下することもあり得るので注意が必要である。特に円周方向のプレストレス導入に関してはその事実が今回の試験により観測されており、所定のプレストレスを部材全体に導入するには十分な考慮が必要である。二重円筒ケーソンのような多種の部材で構成される構造物では、ここの部材単位でプレストレスの導入量を設定するのではなく、有限要素法などにより構造物全体を解析し、導入方法を考えるのが良い。

## 8. あとがき

二重円筒ケーソンの構造上の基本的な技術課題についてはここ4、5年の研究で一通り解明されたと考えられる。平成元年より現地（境港）で実証試験が開始され、施工法の具体的な検討がなされている。また試験堤に波圧計、鉄筋計などの各種の測定計器を取付け、波浪を受けたときのケーソンが実海域で十分な安全性を保持しているか調べる予定である。さらに、今回採用した設計法の適用性についても検証がなされる予定である。これらの成果を踏まえて、今後このケーソンが幅広く採用されるために、設計施工法の整備を行っていく必要がある。

(1990年9月30日受付)

## 謝 辞

二重円筒ケーソンの開発では、運輸省の「海洋構造物の沖合展開の研究開発」の一環として研究会（元良誠三座長）が設けられている。また境港での建設および実証試験に関しては、第三港湾建設局の委員会（合田良実委員長）で審議されている。これら審議のなかで各委員より貴重な提言や意見を頂いている。また、載荷試験では、(社)プレストレスコンクリート技術協会の森下昭吾氏、古賀尚宏氏、岡島武博氏など多数の方々の協力を得ている。ここに関係各位に感謝の意を表する。

## 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)の水理特性と試設計, 港湾技研資料, No. 600, 1987年9月, 21p.
- 2) 清宮 理, 白崎正浩: 2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) 山田一字, 中山千春 他: 開口を有する鉄筋コンクリート板の補強方法に関する研究, 前田技術研究所年報, Vol. 25, 1987年9月, 21p.
- 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I部, 平成元年10月, pp. 576~577.
- 5) Yianni Mavrikios and Joao G. de Oliveira: Design Against Collosion for Offshore Structures. Massachusetts Inst. of Tec., Cambridge, MIT Sea Grant College Program, April 1983, 164p.
- 6) 岩井 聡, 庄司邦昭: 船の衝突に対する橋脚基礎部緩衝施設の規模について, 昭和60年6月, pp. 60~66.
- 7) 西田正孝: 応力集中, 森北出版, 昭和42年, pp. 402~404.
- 8) 大野定俊, 水谷 隆, 小柳 治: RCスラブの押し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し抜きせん断耐力に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第229号, 1974年9月, pp. 105~115.
- 10) CEB-FIP model Code for Conecrete Struc-

tures, CEB-FIP International Recommendation 3rd Edition 1978 COMITE EUROINTERNATIONAL DU BETON, pp.131-134.

- 11) 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.
- 12) 米倉宏行, 宇都宮 透: 模造タンクによるプレストレス導入実験, 三井建設技術研究所報, No.4, 1980, pp.25-36.
- 13) 吉原 忠, 川澄 脩: 大型PCタンクの設計と施工: 水道協会雑誌, 第52巻第2号, pp.37-46
- 14) 清宮 理, 森下昭吾, 古賀尚宏, 岡島武博: 多孔を有するPC円筒波浪制御構造物の耐荷力, プレストレストコンクリート, Vol.32, No.1., Jan., 1989, pp.65-71.
- 15) 清宮 理, 横田 弘, 白崎正浩: 多数の開口を有する円筒壁の耐荷力の実験的研究, 構造工学論文集, Vol.36a, 1990, April, pp.1176-1184.

港湾技研資料 No. 690

1990・12

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 有限会社 つばさ印刷技研

Published by the Port and Harbour Research Institute  
Nagase, Yokosuka, Japan.

Copyright © (1990) by P.H.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.H.R.I.

この資料は港湾技術研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本資料の全部又は一部の転載、複写は、港湾技術研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。