

多数の開口を有する円筒壁の耐荷力の実験的研究

MECHANICAL PROPERTIES OF A CYLINDRICAL WALL WITH OPENINGS

清宮 理* ・ 横田 弘** ・ 白崎 正浩***

By Osamu KIYOMIYA, Hiroshi YOKOTA and Masahiro SHIRASAKI

A double cylindrical caisson made of reinforced concrete or pre-stressed concrete is planned to construct in deep sea around Japan to create wide calm water areas. The cylindrical wall is subjected to wave forces, earth pressures, impact by a ship and so on. Many openings are installed in the fore part of the double cylindrical caisson. Loading tests have been undertaken to know the strength and crack properties of the cylindrical wall with openings where collapse may occur due to stress concentration. Through the analysis of the test results, it was proved that the reinforcement around the opening is effective and the mechanical properties of the cylindrical wall with openings are almost the same as those without openings.

1. まえがき

防波堤で代表される波浪制御構造物は、海岸より離れた地点に線状に配置され、外海からの波浪の侵入を制御して沿岸部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¹⁾がある。二重円筒ケーソンは鉄筋コンクリート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が設けてある。開口の面積は外海側の円筒壁前面の面積の10~20%である。開口を通過した波は、外側円筒壁と内側円筒壁との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に示すように波浪、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、この断面力に耐えられるように部材の諸元を設定する手順で行われる。

二重円筒ケーソンは、境港港や長島港で現在建設中であり、平成元年度に本体の製作が終了する予定である。設計時に、面内力に対する円筒部材の解析、底版やせりもちの構造の決定、開口部の補強方法などの技術的な課題を解決する必要があった。特に開口部に関して、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十分に把握されておらず、構造設計を行う上での問題点となっている。そこでこの間

-
- * 工博 運輸省港湾技術研究所 構造部 構造強度研究室長 (〒239 横須賀市長瀬3-1-1)
 ** 工修 運輸省港湾技術研究所 構造部 主任研究官 (〒239 横須賀市長瀬3-1-1)
 *** 運輸省港湾技術研究所 構造部 研究員 (〒239 横須賀市長瀬3-1-1)

題を解決するため、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開口部を有する円筒壁の強度、ひびわれ性状等の力学的性状を把握する。また、今回の開口部の補強法が有効であるか調べるとともに、現行のせん断強度の算定式などによる計算値と実験値との比較を行ない、算定式の適用性を調べる。本論文ではこれらの実験結果と解析結果について述べる。

2. 円筒壁の耐荷力

2.1 押抜きせん断力

船舶、流木等の衝突では、円筒壁の一点に集中的な荷重が作用する。船舶、流木の速度があまり速くない場合、衝突荷重を静的な荷重として考えて良い。コンクリート製の円筒壁では、この衝突による集中荷重に対して押抜きせん断耐荷力を検討する。押抜きせん断耐荷力は次式²⁾により求まる。

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

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

$$\beta_d = \sqrt[4]{100 / d}, \quad \beta_p = \sqrt[3]{100 \cdot p}, \quad \beta_r = 1 + 1 / (1 + 0.25u/d)$$

f_{cd}' : コンクリートの圧縮強度 (kgf/cm²)

u : 載荷面の周長 (cm), d : 有効高さ (cm), p : 鋼材比

u_p : 検討断面の周長 (図-3参照) (cm), γ_b : 部材係数

載荷点付近に開口部が存在するときは押抜きせん断耐荷力が低下するが、検討断面の周長 (u_p) の設定でこの影響を考慮する。この考え方は、参考文献 (2), (3) 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 で述べた集中荷重あるいは波力、土圧等の分布荷重によって面内力 (軸力) と面外力 (曲げおよびせん断) 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、外側からの外力に対して部材内に圧縮力が生じるので、コンクリート部材としてはかなりの耐荷力がある。しかし、内側からの土圧、水圧に対しては、部材内に引張力が生じるので、耐荷力は小さい。曲げと軸力の両者が作用するコンクリート部材の曲げ耐荷力 (M_u) と軸耐荷力 (N_u') は次式を基に算定できる。

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

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

ここで、 C' : コンクリートの軸力の合力

T_{sc}' : 圧縮側の鉄筋の合力

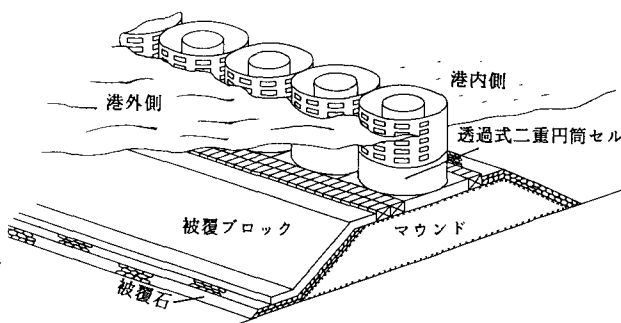


図-1 二重円筒ケーソンの概要

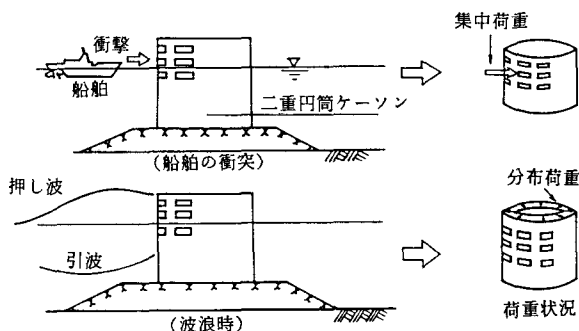


図-2 二重円筒ケーソンに作用する外力

- T_{st} : 引張側の鉄筋の合力
 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_t : コンクリートの圧縮縁から引張鉄筋までの距離
 x : コンクリートの圧縮縁から中立軸までの距離

上式の釣合条件を満足する x を設定して、所定の耐荷力を求める。これらの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。これらの値は、ここでは円筒壁を対象にシェル要素を用いた3次元の有限要素解析によって求める。

2.3 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、材料の耐久性の観点から最大ひびわれ幅を制限する。ひびわれ幅の計算式としてプレストレスの影響や純引張の影響を考慮できる、CEB-FIPの式 (1978年)²⁾ を用いる。

$$\begin{aligned}
 \text{最大ひびわれ幅} \quad W_k &= 1.7 \times W_m \\
 \text{平均ひびわれ幅} \quad W_m &= S_{rm} \times \varepsilon_{sm} \quad \dots (3)
 \end{aligned}$$

ここで、 S_{rm} : ひびわれ間隔、 ε_{sm} : 鋼材のひずみ量

ひびわれ幅の制限値は、 $0.0035c\text{cm}$ (c : かぶり cm) である。試験体でのかぶりを 3cm としているので、ひびわれ幅の制限値は 0.1mm となる。一般的にも海洋環境下では、ひびわれ幅を $0.15 \sim 0.20\text{mm}$ 以内に制限する。

3. 載荷試験

3.1 試験体の構造

載荷試験の対象とした試験体は、表-1に示す4体である。この内2体は鉄筋コンクリート製 (RC)、2体はプレストレストコンクリート製 (PC) である。試験体の構造・寸法を図-4に示す。試験体は開口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、二重の円筒でなく一重の円筒に簡略化しており、寸法的には実物の約1/10である。円筒壁の外径は 2.0m 、壁厚は 0.13m で、底版の辺長は 2.3m 、版厚は 0.2m である。円筒部材の前面上には、幅 30cm 、高さ 15cm 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4隅には辺長 3cm 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。円筒部材では、RCの場合 $\text{D}10$ の鉄筋を鉛直方向に約 12cm 間隔、円周方向に 10cm 間隔に配置する。PCの場合、直径 9.2mm のPC鋼棒を円筒部の円周方向と鉛直方向および床版に配置する。開口部の4隅には長さ 25cm の $\text{D}6$ の鉄筋を各々2本ずつ配置して補強を

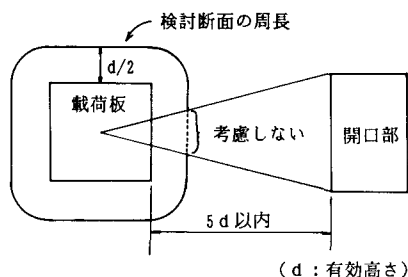


図-3 検討周長の概要

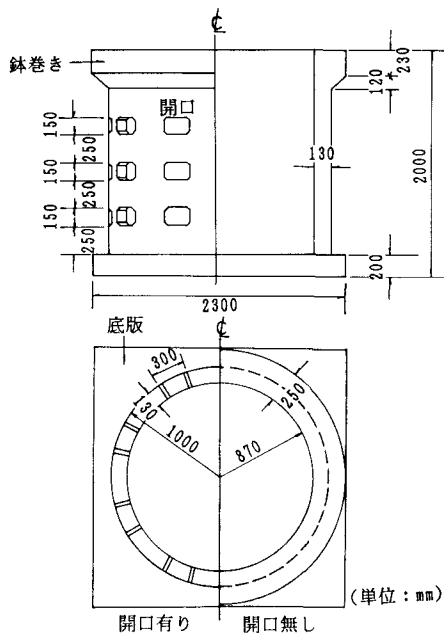


図-4 試験体の概要

表-1 試験体の一覧

試験体番号	構造	載荷方法
1	RC	集中荷重
2	PC	集中荷重
3	RC	等分布荷重
4	PC	等分布荷重

表-2 鋼材の強度

	直径 (mm)	規 格	降伏点 (kgf/mm ²)	引張強さ (kgf/mm ²)	伸 び (%)	弾性係数 (kgf/mm ²)
鉄 筋	10	SD30A	36.5	52.2	27.6	—
PC鋼棒	9.2	SBPR95/110	116	118	12	20500

表-3 コンクリートの配合条件

種類	スラブ [*] (cm)	空気量 (%)	水・セメント 比 (%)	細骨材率 (%)	最大骨材 寸法(mm)
RC用	8±2.5	5±1	75	52	13
PC用	8±2.5	5±1	58	51	13

表-4 試験時のコンクリート強度

(単位: kgf/cm²)

試験体 番 号	種 類	圧縮 強度	引張 強度	曲げ 強度	弾性係数
1	RC	218	21	33	2.19×10^5
2	PC	342	32	54	2.73×10^5
3	RC	226	23	30	2.25×10^5
4	PC	312	30	50	2.67×10^5

行う。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-30A、PC鋼棒
の材質はSBPR95/110であり、表-2に
これら鋼材の機械的性質を示す。

表-3にコンクリートの配合条件を
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、スラブ8cm、
空気量5%を目標とした。配合強度は
RCで210kgf/cm²、PCで330kgf/cm²であ
る。試験時のコンクリート強度を表-4
に示す。PC試験体には、コンクリート
応力で 10kgf/cm²程度のプレストレ
スを導入する。プレストレスの導入で
は、試験体に二次応力によるひびわれ
を与えないように油圧ジャッキの操作
を行い、底版、円筒の鉛直方向、円筒
の円周方向の順に導入を行う。

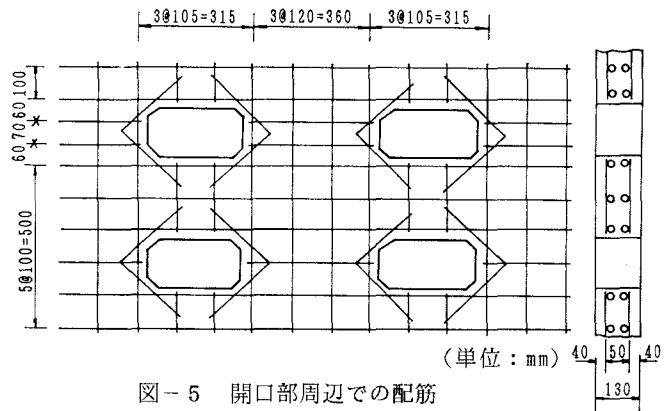


図-5 開口部周辺での配筋

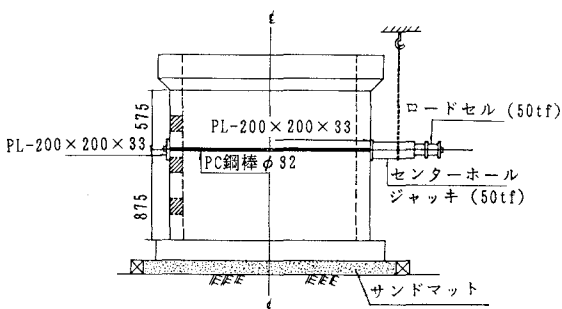


図-6 集中荷重の載荷方法

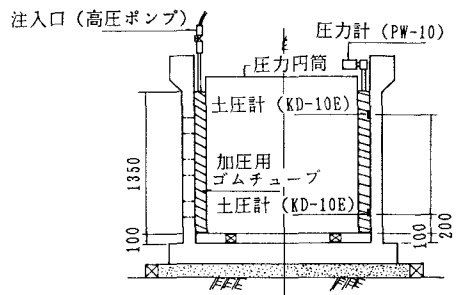


図-7 分布荷重の載荷方法

3. 2 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。集中荷重では、図－6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の正方形の鋼板である。等分布荷重では、図－7に示すように円筒部材の内側にゴム製の袋（容量 75tf/m²）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。

3. 3 計測項目

試験時の計測項目と計測機器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 1台、 土圧計 2台
（試験体の変形） 大変位計 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、 パイ型ゲージ 49点

ここに、カンチレバー型変位計は円筒部材内側と底版との境に、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

載荷実験の結果および計算値を表－5に示す。表中の計算値は、有限要素法による静的解析から得られた断面力を用いて、限界状態設計法で計算したものである。

図－8に各試験体の荷重～変位曲線を示す。集中荷重載荷の場合、載荷点位置で取得した変位に関して、また分布荷重載荷の場合、試験体の円筒壁中央部で取得した変位に関して整理を行った。図－9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付近に発生した。円筒内側については、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あった。円筒外側では、載荷点を離れて図に示すようにV字型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10cm程度であった。これらのひびわれは、曲げによるものと考えられる。開口部のある側と無い側とで、ひびわれの性状は特に大きく変わらなかった。また、開口部の4隅から必ずしもひびわれの発生が顕著でなかった。終局状態は、開口部のある側の載荷点での押抜きせん断であった。破壊は、載荷点近傍に限定された。押抜きせん断に伴う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。No.2のPC試験体でも同様なひびわれ状況と破壊形式を示した。

図－10にNo.4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

表－5 計算値と実験値との比較

試験体 番号	ひびわれ荷重		鋼材降伏荷重		最大荷重	
	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値
1	3.9 tf	6.0 tf	23.0 tf	32.5 tf	25.1 tf	35.7 tf
2	9.8 tf	13.0 tf	24.1 tf	38.0 tf	30.4 tf	42.2 tf
3	1.9 kgf/cm ²	2.2 kgf/cm ²	5.7 kgf/cm ²	5.6 kgf/cm ²	7.7 kgf/cm ²	7.0 kgf/cm ²
4	3.7 kgf/cm ²	4.4 kgf/cm ²	4.9 kgf/cm ²	5.7 kgf/cm ²	6.5 kgf/cm ²	8.0 kgf/cm ²

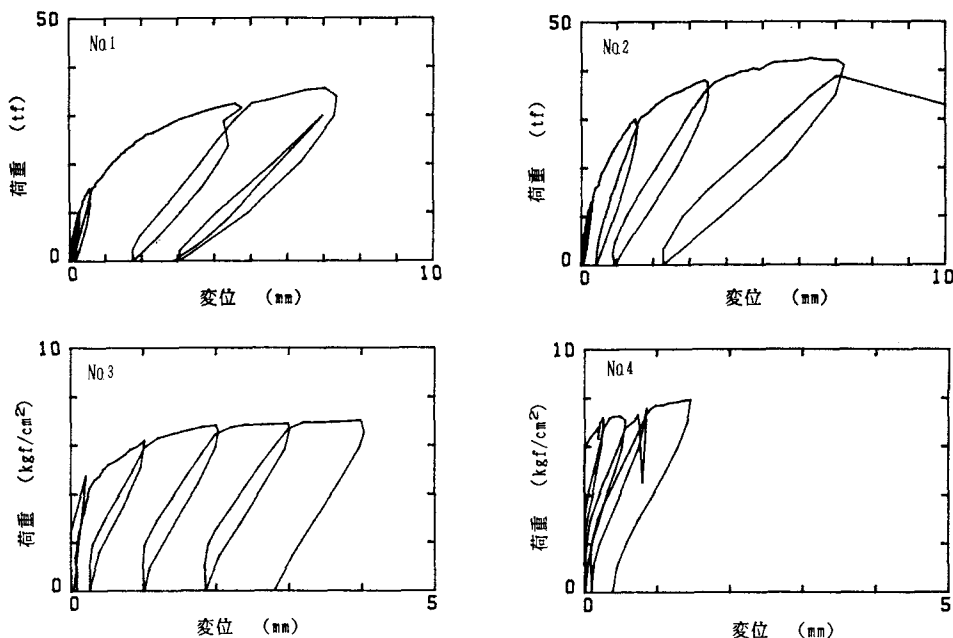


図-8 荷重と変位との関係

生じた。載荷荷重が増加するにしたがって上下方向にひびわれ本数が増加し始め、15～30cm間隔にひびわれが生じた。また、円筒部の中央では、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無い側とで特に大きく変わらなかった。開口部の4隅からひびわれが発生し始めるとは限らなかった。また、上下方向のひびわれは部材をほぼ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。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。また、No.3試験体でもNo.4試験体と同様なひびわれ性状と破壊形式となった。

4. 2 鉄筋のひずみ

図-11にNo.1試験体での載荷点高さでの円周方向鉄筋のひずみ分布を示す。ここで、図中の外側は円筒壁内の外側の鉄筋に、内側は内側の鉄筋に各々取付け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、円周方向の鉄筋のひずみは載荷点付近で大きな値となったが、少し離れると値は非常に小さくなった。この試験体では、載荷点付近で曲げひずみが卓越していたことがわかる。図-12にNo.3試験体での円周方向のひずみ分布を示す。円周方向にはほぼ一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ったことから軸引張力が卓越していた。

図-13に開口部のある側と開口部の無い側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。鉄筋のひずみは円周方向鉄筋で得られたひずみの平均値である。また、コンクリートひずみは37個のパイ型ゲージを円周方向に一列に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、開口部のある側の方が開口部の無い側よりも鉄筋とコンクリートのひずみが若干大きかったが、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。

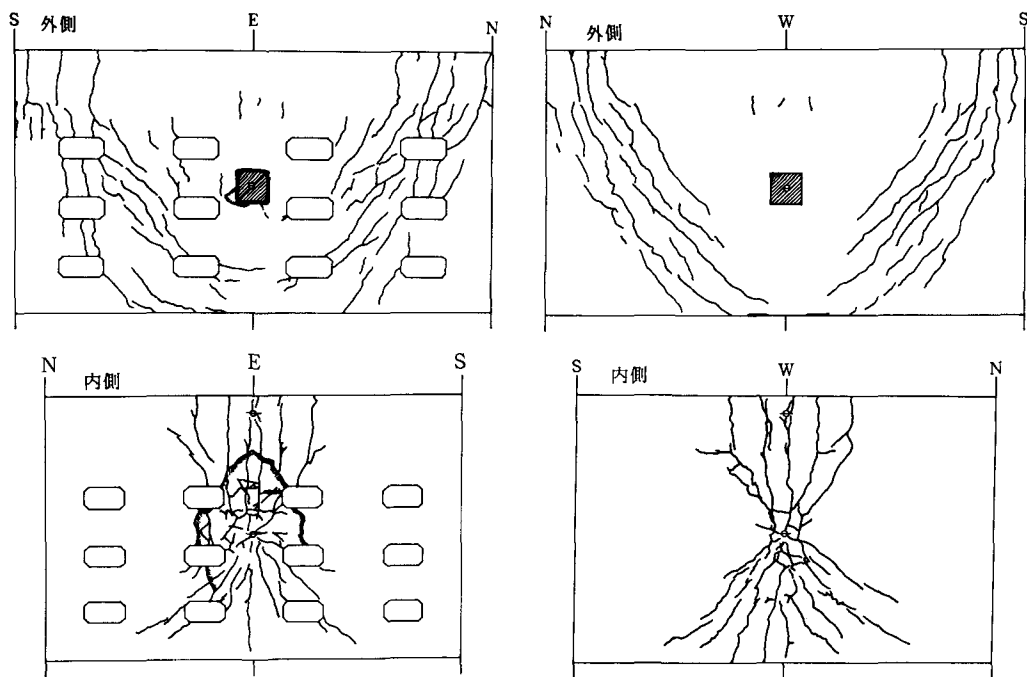


図-9 集中荷重によるひびわれ状況

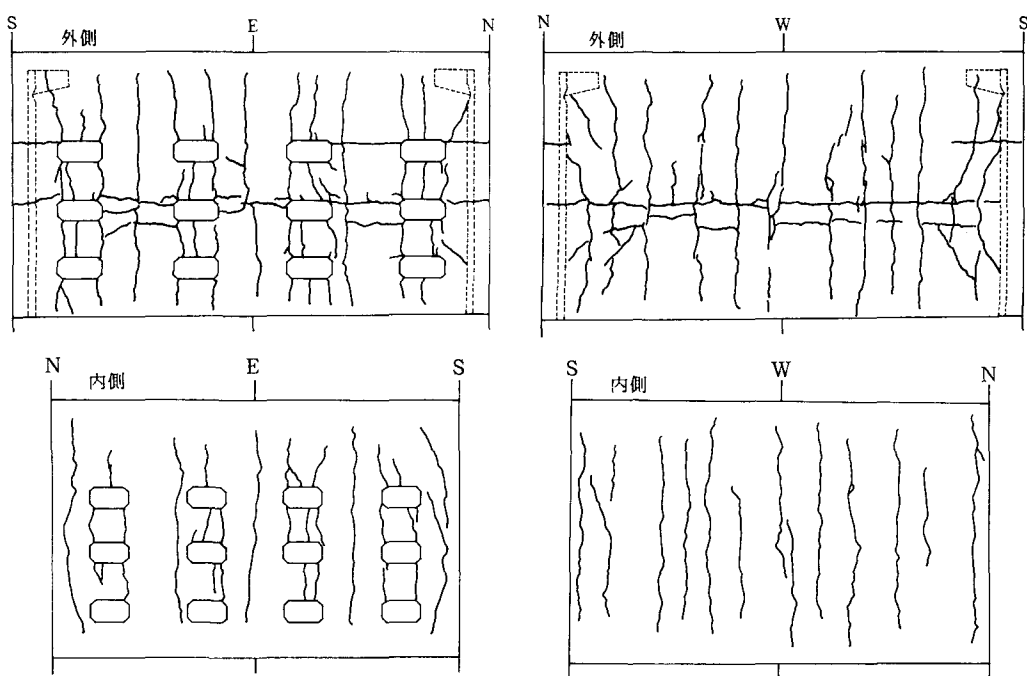


図-10 分布荷重によるひびわれ状況

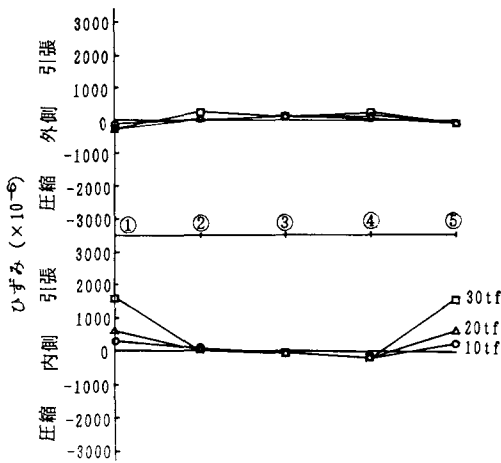


図-11 集中荷重による鉄筋のひずみ分布

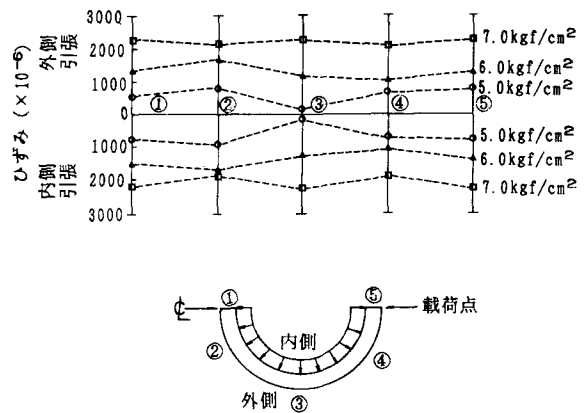


図-12 分布荷重による鉄筋のひずみ分布

4.3 ひびわれ幅

図-14にNo.3試験体での開口部のある側、図-15に同試験体での開口部の無い側で得られた鉄筋の平均ひずみとひびわれ幅との関係をそれぞれ示す。No.3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 $200 \sim 300 \times 10^{-6}$ のときに既に $0.1 \sim 0.2 \text{ mm}$ のひびわれ幅が生じた。開口部の無い側でも、鉄筋の平均ひずみが 500×10^{-6} のとき 0.2 mm に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式(3)で与えら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たことになる。RC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ので注意が必要である。限界状態設計法における使用限界状態の検討では、飛沫帯でのひびわれの発生を許さない設計法を採用するのが良い。

4.4 押抜きせん断耐力^{5, 6)}

図-16にNo.2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-5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算定された試験体の押抜きせん断力は 16.7 tf である。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、既往の設計式を用いた場合には、 u_p の 62% しか有効でなかったことになり、計算値と実験値との開きは大きい。また、式(2)より計算される終局曲げモーメントよりも計算される押抜きせん断力の方が小さな値となり、実験結果と一致しない。この原因の1つとして、円筒部材の曲率

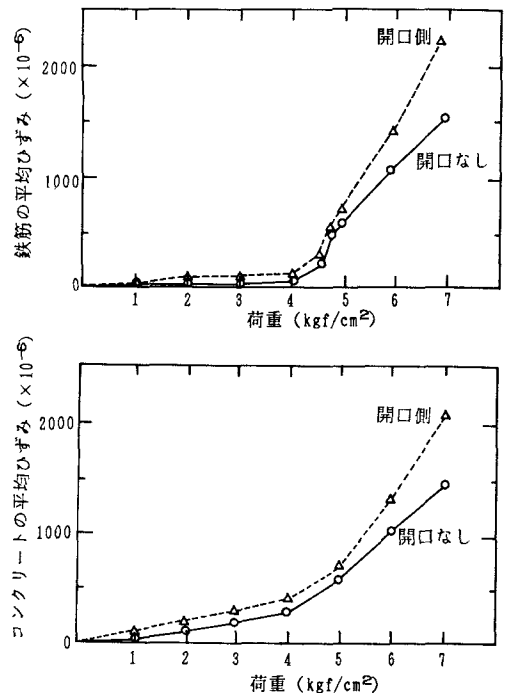


図-13 載荷荷重と平均ひずみとの関係

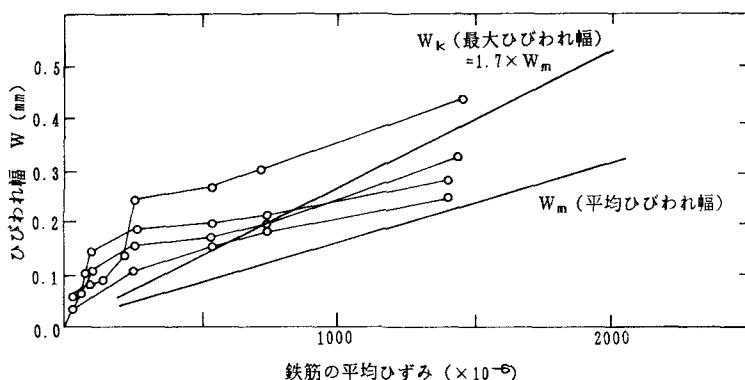


図-14 鉄筋ひずみとひびわれ幅との関係 (No3, 開口のある側)

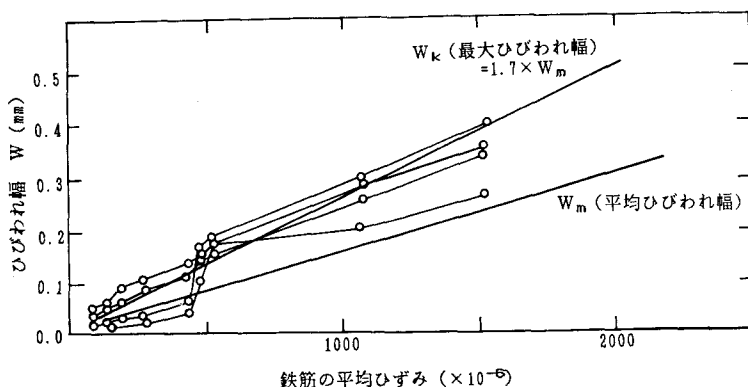


図-15 鉄筋ひずみとひびわれ幅との関係 (No3, 開口のない側)

の影響が考えられる。載荷版直下のコンクリートの圧縮領域が部材が平面のときよりも広くなる。すなわち、曲率の影響で中立軸が下方へ移動する。

載荷試験でのひびわれ状況を勘案して u_p を推定する。円筒壁の場合、平面に比べて u_p の値は1.3倍大きくなる。また、開口部周辺を十分に補強しておけば、今回の載荷位置と載荷版の大きさの下で、開口による $5d$ の範囲内での u_p の低減を考えなくとも良いと考える。この両者を考慮したときのせん断耐力は37tとなり、実験値にかなり近づく。このように、式(1)での考え方をそのまま多数の開口を有する円筒壁に適用できないことがわかった。

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、円筒壁のかなり広い範囲に曲

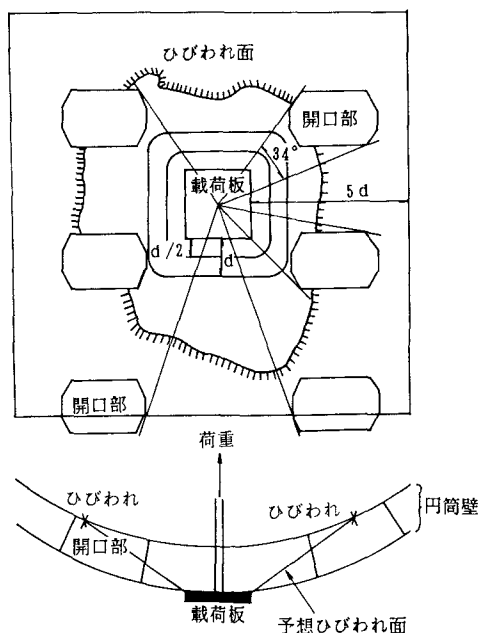


図-16 押抜きせん断によるひびわれの発生状況

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。破壊は、載荷点近傍に限定された。一方、内側からの等分布載荷では円筒壁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、円筒壁が外側に膨らみ出し、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。開口部の4隅で破壊が集中する傾向は見られず、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かった。

③ 開口部が多数存在する円筒壁の押抜きせん断耐力の検討では、既往（限界状態設計法およびCEB-FIP）の設計式による計算値は、実験値の半分にも満たない耐力しか算定しなかった。この原因として、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が引張側へ移行することに伴い、検討断面の周長が長くなることが考えられる。また、開口部の存在による周長の低減範囲を部材の有効厚さの5倍以内と設定する必要の無いことが考えられる。開口部周辺を十分補強しておけば、周長の低減範囲を既往の設計式に示されるように設定しなくても良いと言える。

④ 内側から等分布荷重を受けるRC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した。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幅より大きな値となり、注意が必要である。

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) CEB-FIP Model code for concrete structures, CEB-FIP International Recommendations 3rd Edition 1978
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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2日受付)