

港湾技術資料

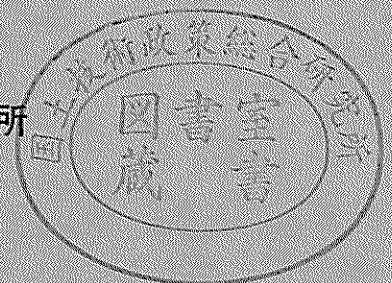
TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 759 Sept. 1993

半円形防波堤部材の載荷試験

清 宮 理
本 多 宗 隆

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. まえがき	3
2. 半円形防波堤の構造設計	4
2.1 構造の概要	4
2.2 作用する外力と断面力	5
3. 限界状態設計法による構造設計	7
3.1 終局限界状態の計算	8
3.2 使用限界状態の計算	10
4. 載荷試験の概要	11
4.1 試験体の構造	11
4.2 使用材料	14
4.3 プレストレスの導入	15
4.4 載荷方法	16
4.5 測定項目と測定方法	17
5. 試験結果	18
5.1 ひびわれ状況と破壊形式	18
5.2 荷重と変位の関係	22
5.3 鋼材とコンクリートのひずみ	25
5.4 ひびわれ幅	27
6. 計算値と試験値との比較	29
7. 結論	30
あとがき	30
参考文献	30

Loading Test of Semi-circular Pre-stressed Concrete Member

Osamu KIYOMIYA *
Munetaka HONDA **

Synopsis

Semi-circular pre-stressed concrete member is introduced to structural members of new types of breakwater caisson. The perpendicular component of external wave force can contribute to the overall stability of the caisson and lighten its weight. This characteristic is advantageous to construct the caisson on soft sea ground. Furthermore configuration of the caisson with semi-circular members has excellent landscape in port area.

Static loading tests are carried out to know fundamental mechanical properties of the member and to confirm the validity of limit state design method for this type of breakwater caisson. Four specimens are fabricated and distributed load are applied to them by hydraulic pressure with rubber tubes.

Through loading tests, semi-circular members have bending collapse in ultimate stage and joints part has severe damage. Significant collapse is not observed at opening part.

Key Words: Semi-circular member, Loading test, Pre-stressed concrete, Limit State Design Method

* Chief of Structural Mechanics Laboratory, Structural Engineering Division
** Ex-Member of Structural Mechanics Laboratory, Structural Engineering Division
(Fifth District Port Construction Bureau)

半円形防波堤部材の載荷試験

清 宮 理*

本 多 宗 隆**

要 旨

半円形防波堤は本体が軽量なので軟弱地盤に適応し、かつ円形部材であることから景観にも優れている。半円形防波堤の半円形部材は、プレストレストコンクリート製であるが、その終局耐力等の計算法の検討を行うため実物の1/3模型で載荷実験を実施した。試験体は4体で、押し波時及び引き波時について、終局限界および使用限界に対応する載荷を行い、鋼材およびコンクリートのひずみ、コンクリートのひびわれ、ひびわれ発生荷重、鋼材降伏荷重および終局荷重を求めた。これらの結果、限界状態設計法の適用性を確認し、また、接合部の構造細目を提示した。

キーワード：半円形部材、載荷試験、プレストレストコンクリート、限界状態設計法、コンクリート部材の接合部

1. まえがき

沿岸域での空間利用の要望の増大にともない静穏海域の創成が求められ、波浪制御構造物の開発と建設が鋭意行われている。波浪制御構造物の建設に際しては、①波浪、地震などの外力や軟弱な海底地盤などの過酷な自然条件に対する安全性の確保、②確実に迅速な施工、③低廉な建設費などが要求される。また市民生活の場に近いところに建設する場合には景観や環境保全に対する配慮が最近とみに求められてきている。これらの要求を満足するためには、従来の構造形式以外の新しい構造形式の採用も必要となる。

半円形防波堤は、図-1に示すように半円形の部材と平らな底版とで構成されているが、軟弱な海底地盤で有利かつ景観性に優れている構造形式として谷本ら¹⁾が提案したものである。

すなわち半円形部材を採用することにより波圧を水平方向と鉛直方向との2成分に分けられ、この鉛直の成分により堤体の滑動安全性が増加する。また、半円形部材面に直角に作用する波力成分は半円の中心を通ることから地盤反力がほぼ一様分布となり、かつ堤体重量が軽い

ことから通常の箱型ケーソンと較べて地盤反力が小さくなる。従来の重力式防波堤よりも堤体重量を軽くできるので軟弱な海底地盤に有利である。このほか半円形部材では直立壁のような衝撃的な波圧が部材前面に発生しにくい利点がある。景観については、堤体形状が曲面であることから構造物に柔らかみを与える。

このような利点を保有する半円形防波堤であるが、従来にない様式であるので、構造設計および施工に関わる技術的な課題を検討するための宮崎港において実証試験が実施されており、下記の項目について検討が行われている。

- ① 波浪時に堤体に作用する波圧強度と分布の把握
- ② 波浪に対する堤体の滑動に対する安全性
- ③ 構造設計法と部材の安全性の確認
- ④ 施工性の検討

半円形部材に作用する波圧については、谷本らが実験結果をとりまとめ公式¹⁾を提案している。本資料は、実証実験堤の設計を行うに際し、上記の項目のうち③の構造設計法と部材強度の把握について検討した結果について述べる。半円形防波堤の構造設計法に関わる検討項目は以下のとおりである。

* 構造部 構造強度研究室長

** 元構造部 構造強度研究室（現第五港湾建設局）

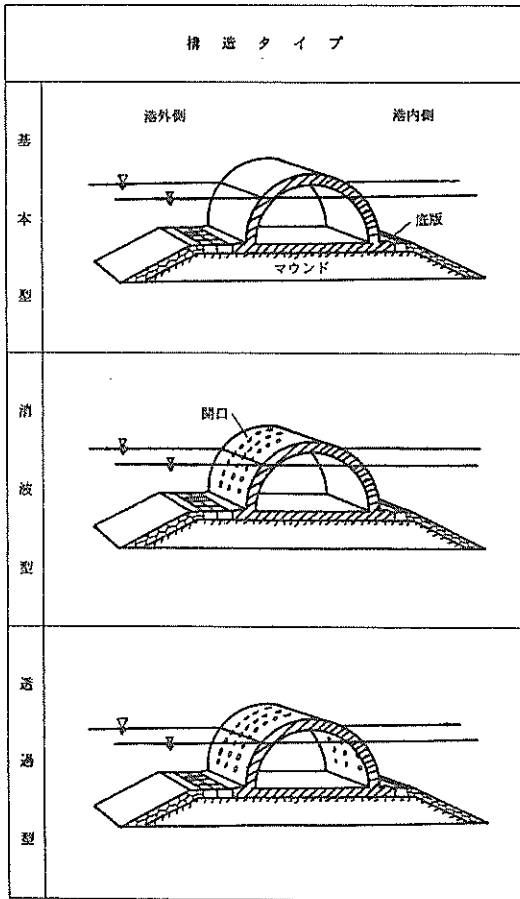


図-1 半円形防波堤の概要

- ① 半円形部材および接合部の耐荷力や変形性能などの基本的な力学性状の把握。
- ② 限界状態設計法を半円形防波堤に適用する際の留意事項の整理と設計法での安全性の把握。

③ 開口部や接合部の構造細目の検討。

円形部材は曲面スリットケーソン²⁾や二重円筒ケーソン³⁾などの港湾構造物で既に採用されている。円形部材の力学性状については、載荷試験⁴⁾や材料非線形性を考慮した有限要素法⁵⁾により検討されてきた。円形部材では軸力の作用を考慮する必要があること、半径が大きければ曲率の耐荷力に及ぼす影響が小さいこと等が明らかにされている。また多数の開口の存在する円形部材の力学性状と開口部の補強方法についても載荷試験⁶⁾⁷⁾などで明かにされてきている。基本的には円形部材の構造設計はこれらの知見を基に十分可能である。今回の研究では、特に限界状態設計法で設計した構造部材が、どの程度の荷重によりひびわれや破壊が生じるのか、またもし半円形防波堤が波浪により破壊した場合のような破壊性状と変形を示すのかを載荷実験により確認することを目的としている。設計段階で予期されない破壊性状を載荷試験時に示した際には、半円形部材の構造細目の変更が必要となる。

2. 半円形防波堤の構造設計

2.1 構造の概要

宮崎港の実証実験堤の断面図を図-2に示す。また写真-1は陸上ヤードでの製作状況である。半円形防波堤は半円形のプレストレストコンクリート部材と鉄筋コンクリート製の底版より構成される構造である。半円形部材には波圧作用時に全断面引張軸力が作用する箇所があるのでプレストレストの導入が力学的に有利となる。半円形部材の半径は9.8m、部材厚は0.5mで、底版との接合部のハンチ部分の部材厚は0.75mである。長さ3mの部材4個をPCケーブルで横締めして一体とする。半円形防波堤の実験堤の全長は12mであるが、内部は中空で

実証実験堤（半円形防波堤）断面図（標準堤）

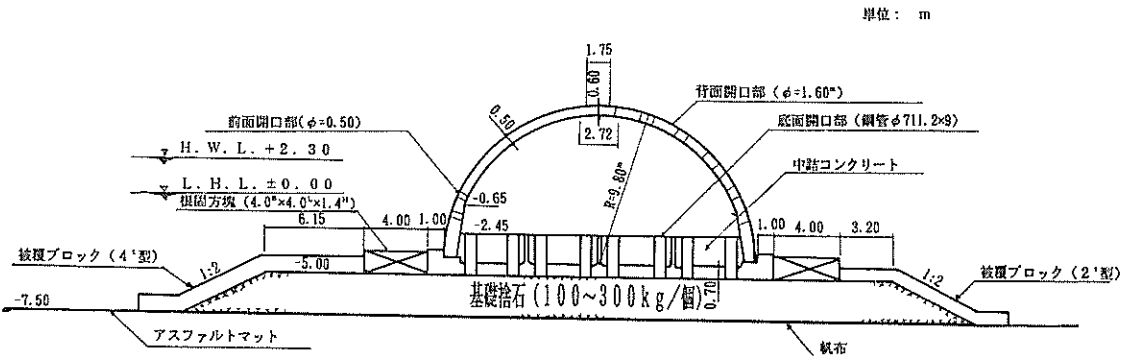


図-2 半円形防波堤の断面図（宮崎港）

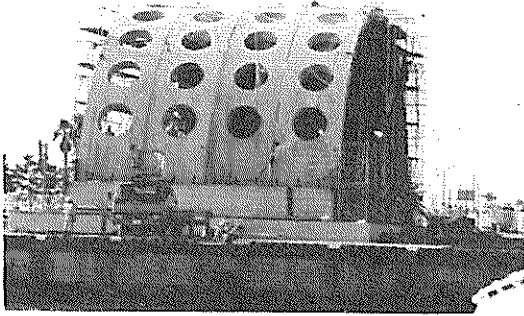


写真-1 半円形防波堤の製作状況

通常の箱形状の重力式ケーソンより総重量が軽量である。底版上には滑動への安定性を増すために捨てコンクリートが約2mの厚さで打設されている。半円形部材には、港内側に円形の開口部が設けられている。ただし、図-1に示すように開口部の位置により、消波型（開口を港外側の堤体前面部に取り付ける）、透過型（開口を前面と背面に取り付ける）および基本型（開口を設けない）の3種類がある。港内側の壁面に開口を設けケーソン内部を遊水室とするので港内の反射波を低減できる。また開口部を前面と背面に設けることにより通水性を確保し港内の環境保全に寄与することが出来る。現地での状況や要望を勘案して上記形式のうち適当なものを選定できる。宮崎港での構造形式は透過型である。宮崎港実証実験堤の港内の反射波を低減する目的で港内側に25%、海水交換の目的で前面に10%、また揚圧力を低減する目的で底版に10%の開口を設ける。ここで開口率は個々の部材の表面積に対する比である。円形に開口部の大きさは、背面で直径が1.6mで前面で0.5mである。なお図-3に構造設計の手順と載荷試験および実証試験との関連を示す。

2.2 作用する外力と断面力

宮崎港における実証試験堤の設計条件の概要は以下のとおりである。

- ① 設置水深： 海底面 -7.5m
マウンド高さ-5.0m
- ② 潮位： H.W.L.+2.30m
M.W.L.+1.15m
L.W.L.±0.00m
- ③ 設計波浪：終局限界状態では50年確率波を設定
波高 ($H_{1/3}$) = 8.0m
周期 ($T_{1/3}$) = 13.6 s

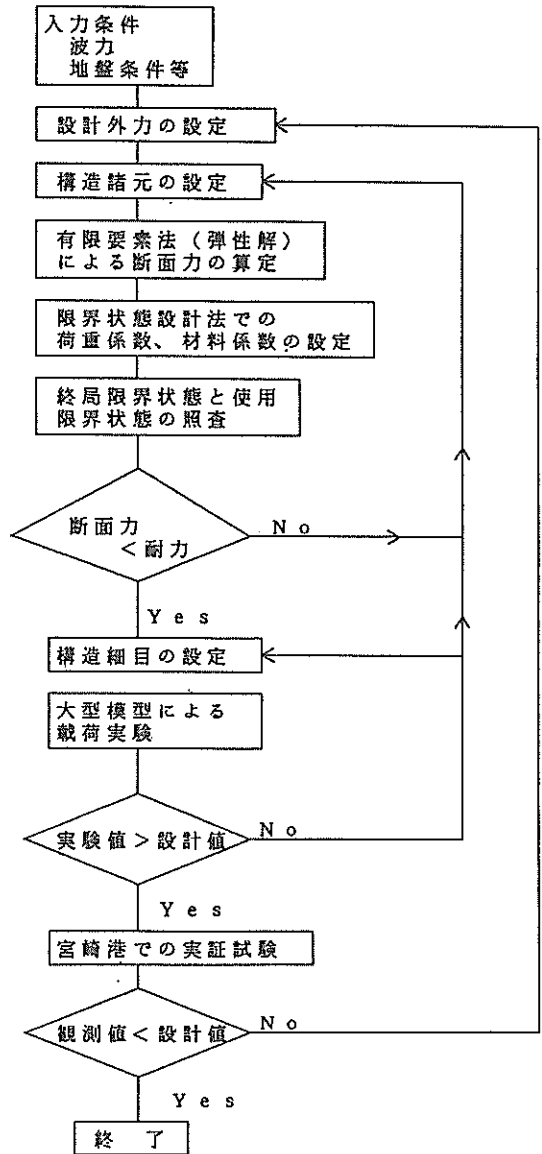


図-3 半円形防波堤の構造設計での検討フロー

入射角 (β) = 13度

使用限界状態では1年確率波を設定

波高 ($H_{1/3}$) = 5.5m

周期 ($T_{1/3}$) = 8.5 s

入射角 (β) = 13度

- ④ 土質条件：-13.5mまで比較的緩い砂質土で、この砂質土層より-18.6mまで比較的軟弱な粘性土である。この下層は風化岩である。

- ⑤ 構造：半円形部材の半径=9.8m
部材厚=0.5m, 奥行き=3m

部材導入プレストレスト量, 約20kgf/cm²

⑥ 部材設計：半円形部材の構造設計は限界状態設計法で行う。この際の安全係数, 材料係数などの諸値を表-1に示す。

ここでは荷重として, 波圧, プレストレスト量および自重を考慮した。終局限界状態での作用荷重は, これら個々の荷重に荷重係数を乗じて1.5×波圧 (50年確率波) + 1.0×プレストレスト量 + 1.0×自重である。使用限界状態での作用荷重は, 1.0×波圧 (1年確率波) + 1.0×プレストレスト量 + 1.0×自重である。

表-1 安全係数の設定値

安全係数	記号	種類	終局状態	使用状態
材料係数	γ_m	コンクリート 鋼材	1.3 1.0	1.0 1.0
荷重係数 波力 水圧 死荷重	γ_w	固体重 付帯施設重量	1.5 1.1 1.1 (0.9)	1.0 1.0 1.0 1.0
プレストレスト			1.1 (0.9)	1.0
荷重組合せ係数	ϕ		1.0	1.0
構造解析係数	γ_s		1.0	1.0
部材係数	γ_e	曲げ・軸方向力 せん断(コンクリート) (鋼材)	1.15 1.3 1.15	1.0 1.0 1.0
構造物係数	γ_t			1.0

注) 荷重係数における()内は設計荷重に対して有利に作用する場合を示す。

水理実験より得られた半円形防波堤に作用する波圧分布⁹⁾を以下に示す。設計波力としては, 半円形部材の外側から作用する押波と内側から作用する引き波時の2種類を設定する。

図-4(a)は, 半円形部材の外側から作用するときの波力分布である。直立壁に作用する合田式による波圧分布にバラベットや通路などを半円形部材の上部に取り付けた場合の上部工の波圧分布や波圧の位相差を考慮した修正係数を乗じて設計に用いる波圧分布が求められる。ここで上部工は, 半円形部材上部に取り付けられた通路などの構造部分を指す。図-4(a)では半円形防波堤に作用する水平波力が最大のときの波力分布を示している。半円形部材に作用する波力の方向は円の中心を向いている。この際底版の港外側の端部で P_3 , 港内側で0の三角形分布をする揚圧力が生じるものとする。波圧分布は次式で与えられる。

$$p_1(\theta) = \lambda_1 PG_1 \cos(\theta_1)$$

$$p_3(\theta) = \lambda_3 \lambda_p PG_3 \cos(\theta_3) \quad (1)$$

ここで $P_1(\theta)$: 静水面位置での波力

$P_3(\theta)$: 底版位置での波力

PG_1 : 静水面位置での合田波圧 $\cos(\theta_1)$

PG_3 : 底版位置での合田波圧

λ_1 : ケーソンの形式による低減係数
(実験堤では1.0)

λ_p : 位相差による低減係数

図-4(b)は半円形部材の内側から作用するときの波力分布である。透過型や消波型では防波堤内の遊水部の波面上昇にともない空気層が圧縮され衝撃的な波力が生じることもあるが, 実証実験堤のような構造形式では, この恐れがないので引き波時に内側から静水圧のみ作用すると設定する。

この様にして得られた宮崎港の実証試験堤に対する50年確率波および1年確率波の波圧分布を図-5に示す。

この波圧分布を基に半円形部材に生じる断面力の計算を行う。計算は, 有限要素法による構造計算用の汎用プログラムISAPを用いて行った。ただし, ISAPでは部材での応力とひずみとの関係を線形として取り扱っているので, コンクリートのひびわれや部材でのヒンジの生成などの非線形性は考慮されていない。ISAPでは構造

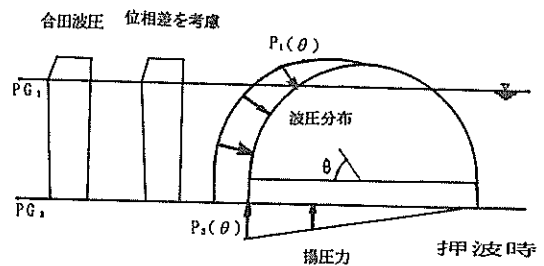


図-4(a) 円形部材に作用する波力分布(外側)

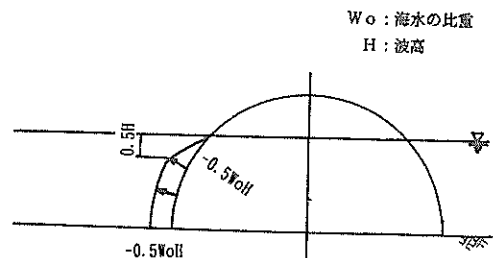


図-4(b) 円形部材に作用する波力分布(内側)

物の終局耐力を求められない。図-6は構造モデルである。半円形部材を18の梁要素に分割し底版との接合部の両下端は固定条件とする。この場合、梁要素を用いることからモデルにおいて開口は考慮していない。また底版上には捨てコンクリートが打設されるが、この部分はばねに置き換えてモデル化し、そのばね定数はコンクリー

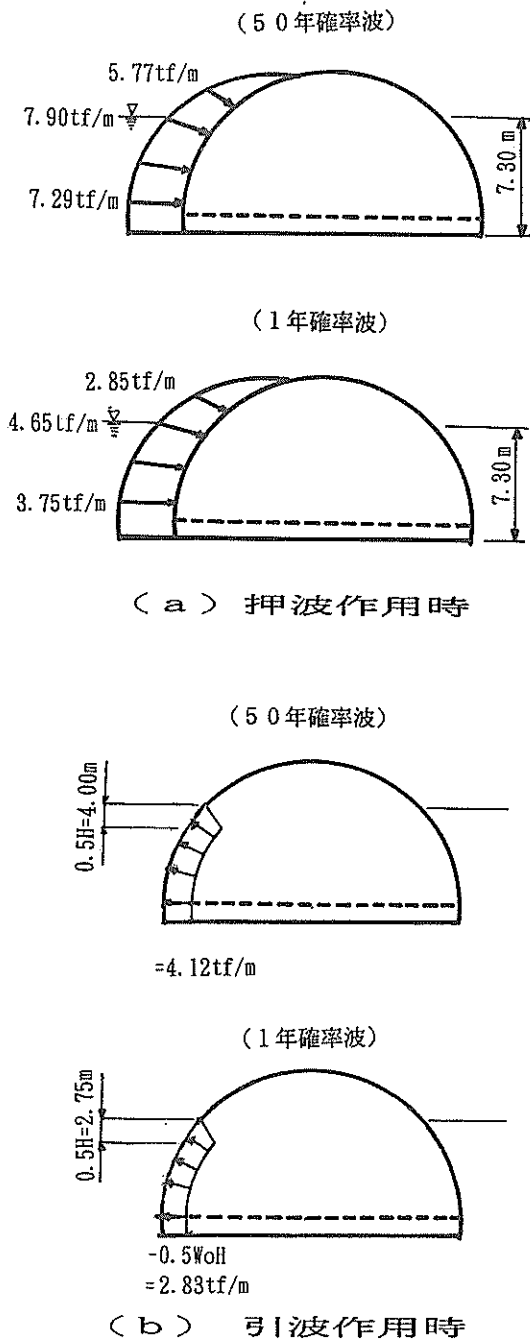


図-5 宮崎港試験堤での波力分布

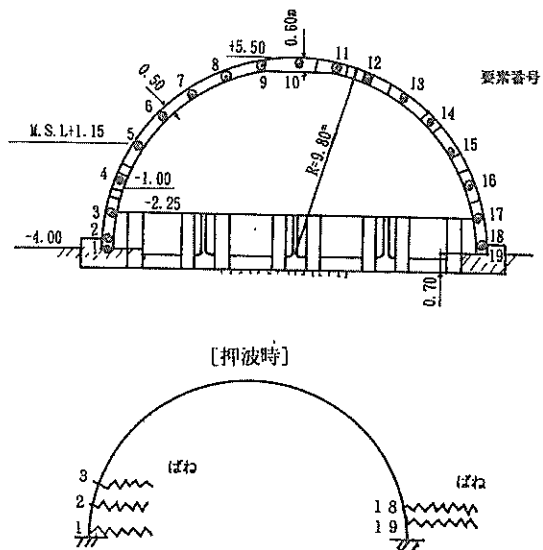


図-6 構造モデル

トの弾性係数と部材寸法から $2 \times 10^6 \text{tf/m/m}$ とした。図-7は50年確率波の押し波時の断面力分布である。港外側のハンチ部に -83.7tf-m で最大曲げモーメントが発生する。軸力は半円形部材沿いに 8tf から 22tf の圧縮力として計算される。外側からの荷重に対しては半円形部材には引張軸力は計算されない。最大せん断力はハンチ部で -83.8tf である。図-8は同じく50年確率波での引き波時の断面力分布である。引き波時では港外側の下端に 26.9tf-m の最大曲げモーメントが発生する。軸力は半円形部材沿いにほぼ一様な引張力となる。本防波堤では押し波時の方が引き波時より部材断面力にとって厳しい条件となる。

3. 限界状態設計法による構造設計

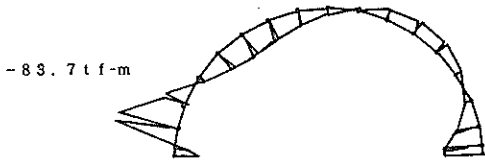
半円形部材はプレストレストコンクリート部材で製作される。設計は限界状態設計法によって行うが、これまでに曲面スリットケーソン堤、二重円筒ケーソン堤等のプレストレストコンクリート部材も限界状態設計法によって設計されている。

ここでは半円形部材の終局限界状態として、曲げとせん断に関して終局時の耐荷力を照査する。また使用限界状態では、コンクリート表面のひびわれ幅を照査する。ただし本資料では、疲労限界については検討していない。

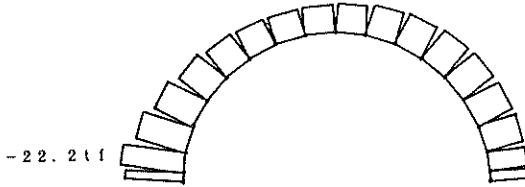
3.1 終局限界状態の計算

破壊抵抗曲げモーメントは土木学会コンクリート標準示方書⁹⁾に示される方法に基づいて算定する。ここでの計算上の仮定は、以下のとおりである

曲げモーメント図



軸力図



せん断力図

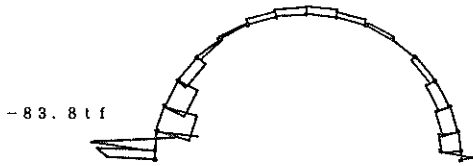
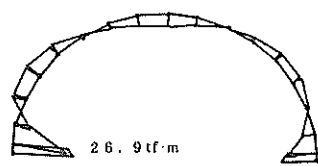
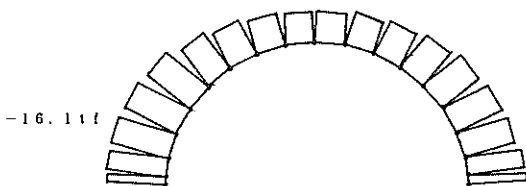


図-7 断面力分布図 (50年確率波、押波時)

曲げモーメント図



軸力図



せん断力図

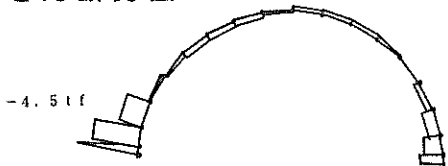


図-8 断面力分布図 (50年確率波、引波時)

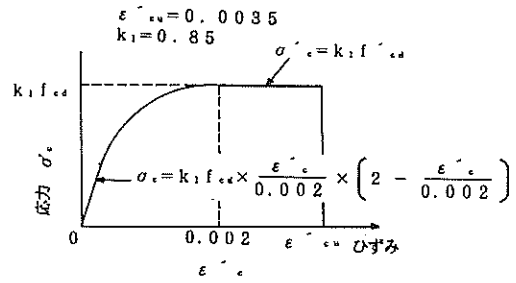
- (1) ひずみは断面の中立軸からの距離に比例する。
- (2) コンクリートの引張強度は無視する。
- (3) コンクリートと鋼材での応力度とひずみとの関係は材料非線形である。それぞれの材料の応力-ひずみ曲線は図-9による。

図-9においてコンクリートに係わる記号は、

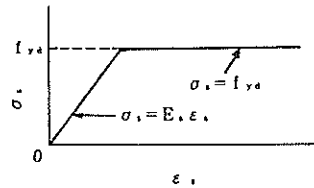
- f'_{cd} : コンクリートの圧縮強度
- σ'_c : コンクリートの圧縮応力度
- ϵ'_c : コンクリートの圧縮ひずみ
- ϵ'_{cu} : コンクリートの終局圧縮ひずみ (=0.0035)である。

また鋼材に係わる記号は、

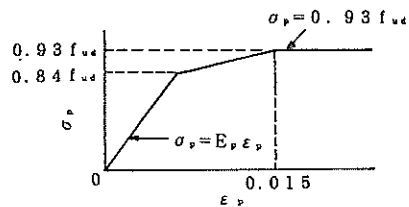
- f_{yd} : 鉄筋の降伏強度
- σ_s : 鉄筋の応力度
- ϵ_p : PC鋼材のひずみ
- f_{pu} : PC鋼材の引張強さ



コンクリートのモデル化された応力-ひずみ曲線



鉄筋および構造用鋼材の
応力-ひずみ曲線



- (b) PC鋼線、PC鋼線より線およびPC鋼棒1号の応力-ひずみ曲線

鋼材のモデル化された応力-ひずみ曲線

図-9 コンクリート及び鋼材の応力-ひずみ曲線

- ϵ_s : 鋼材のひずみ
- ϵ_{ps} : PC鋼材の有効引張応力度におけるひずみ
- E_s : 鉄筋のヤング係数
- E_p : PC鋼材のヤング係数

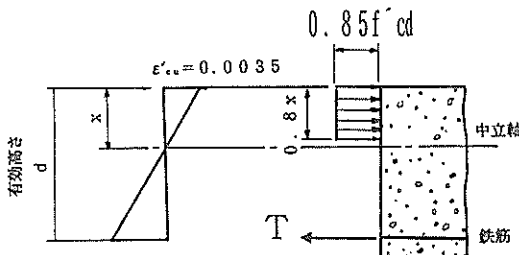
である。

部材の曲げ耐力 M_u は以下の手順により算出する。
 コンクリートの圧縮応力度の分布は、図-10に示す等価応力ブロックとして計算する。部材断面内の圧縮応力度の分布形は曲線となるが、この曲線部分の圧縮応力度の合力を等価な断面積を持つ長方形分布に置換するものである。しかし、コンクリートのひずみが0.002未満で終局ひずみに達してないときには、等価ブロックの考え方が使えないので、図-11においてコンクリートの応力ひずみ関係の曲線部分を正確に積分する必要がある。鋼材が降伏しコンクリートが圧壊する状態では、等価ブロックを使用できないときのコンクリートの圧縮力は次式となる。

$$c = \int_0^{X_0} 0.85 f'_{cd} B \frac{\epsilon / X}{0.002} \times \left[2 - \frac{\epsilon / X}{0.002} \right] dx \quad (2)$$

ここで c : 部材幅である。

またコンクリートの圧縮域の図心位置 (\bar{X}) は次式で求められる。



等価応力ブロック

図-10 等価応力ブロック

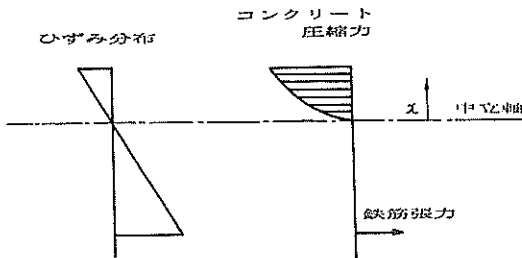


図-11 ひずみ及びコンクリート圧縮応力度の分布

$$X_p = \int_0^{X_0} 0.85 f'_{cd} B X \frac{\epsilon / X}{0.002} \times \left[2 - \frac{\epsilon / X}{0.002} \right] dx / c \quad (3)$$

部材軸方向の力のつり合い条件から次式が得られる。

$$N = C + T_{su} + T_{pr} - T_s \quad (4)$$

ひずみが部材断面内で線形であると仮定すると、ひずみの適合条件より次式が得られる。

$$\frac{X}{\epsilon_{su}} = \frac{X - d_{su}}{\epsilon_{su}} = \frac{X - d_{pu}}{\epsilon_{pu}} = \frac{d_{pf} - X}{\epsilon_{pf}} = \frac{d_{sf}}{\epsilon_{sf}} \quad (5)$$

ここに

- X : コンクリートの圧縮縁から中立軸位置までの距離
- d_{su} : 鉄筋(s)及びPC鋼材(p)の有効高さ (u: 上側, l: 下側を示す添字)
- ϵ_{su} : コンクリートの終局圧縮ひずみ (=0.0035)
- ϵ_{pu} : コンクリートが終局圧縮ひずみに達した時の鉄筋及びPC鋼材のひずみ
- C : コンクリートの圧縮抵抗の合力
- T_{su} : 鉄筋の圧縮と引張抗力の合力
- T_{pr} : PC鋼材の圧縮と引張抗力の合力である。

中立軸位置までの距離 X を求め、式 (6) を用いて部材の終局曲げ耐力 (M_u) を算出する。

$$M_u = CY + T_{su}(X - d_{su}) + T_{pu}(X - d_{pu}) + T_p(d_p - X) + T_s(d_s - X) + N(H/2 - X) \quad (6)$$

ここに N : 作用軸力

Y : 中立軸からコンクリートの圧縮抗力重心位置までの距離である。

せん断耐力はコンクリートと鋼材での力の釣合から得られるトラス理論により算定する。せん断耐力は、同じくコンクリート標準示方書に示される以下の式に従って計算する。

$$V = f_{vd} b_w d + A_w f_k Z (\sin \alpha + \cos \alpha) / s \quad (7)$$

ここで、

$$f_{vd} = f_{vd}(1 + \beta_d + \beta_p + \beta_n)$$

$$f_{vd} = 0.94 \sqrt[3]{f'_{ck}}$$

$$\beta_d = \sqrt[4]{100/d - 1}$$

$$\beta_p = \sqrt{100 - P_w - 1} \leq 0.73$$

$$\beta_n = M_o / M_d \leq 1$$

b_w : 部材の腹幅 d : 部材断面の有効高

A_w : 一組のせん断補強鉄筋の断面積

f_{yk} : せん断補強鉄筋降伏強度 = f_y

Z : $d / 1.15$

α : せん断補強鉄筋と部材軸とのなす角度

s : せん断補強鉄筋の間隔

f'_{ck} : コンクリートの圧縮強度の特性値

P_w : 軸方向引張鉄筋断面積 (A_s) の腹部断面積に対する比率, $A_s / b_w d$

M_o : 作用曲げモーメント (曲げに対する部材耐力の算定値)

M_o : 断面内に引張応力を生ずる限界の曲げモーメント

f_y : 鋼材の降伏強度の特性値である。

部材に軸圧縮力のみが作用するとき耐荷力 (N') は、コンクリートと鋼材の強度を単純に累加して次式で得られる。

$$N' = 0.85 B h f'_{ck} + (A_{su} + A_s) f_y + A_{sp} f_{pd} \quad (8)$$

また部材に軸引張力のみが作用するときの耐荷力 (N'') は、鋼材のみが抵抗するとして次式で得られる。

$$N'' = (A_{su} + A_s) f_y + A_{sp} f_{pd} \quad (9)$$

ここで

h : 部材厚さ

$A_{su} + A_s$: 圧縮と引張鉄筋の総断面積

A_{sp} : PC鋼材の断面積である。

限界状態設計法では材料強度や荷重について個々に安全係数を設定して構造計算を行う。計算に用いるコンクリートと鋼材の強度は、設計値と特性値とに分類される。特性値は材料の強度そのものを示し、設計値はこの特性値を材料係数で除したものである。この特性値は本来多数の材料試験結果から統計的に処理し、平均値に偏差を加えた値として与えられるが、本資料では、材料の強度試験から得られた平均値を特性値とする。すなわちコンクリートでは円形試験体の圧縮強度、鋼材では試験片の引張試験での降伏強度である。設計値は、特性値を材料係数で除した値で、終局限界状態では表-1に示すようにコンクリートは1.3、鋼材は1.0とする。また、使用限界状態ではいずれも1.0とする。

次に、半円形部材の終局限界状態を式(6)によって計算する。半円形部材には曲げモーメントと軸力が同時

に作用することから両者を考慮して終局限界状態を求める必要がある。図-12はこの両者を考慮して求めた破断面の曲げ～軸力相関図である。図-12では部材厚50cmの半円形本体部、標準部および部材厚75cmのハンチ部について降伏面に対する曲げモーメントと軸力との相関図を示している。図には、特性値及び設計値に基づく両者の降伏面をそれぞれ破線および実線で示している。

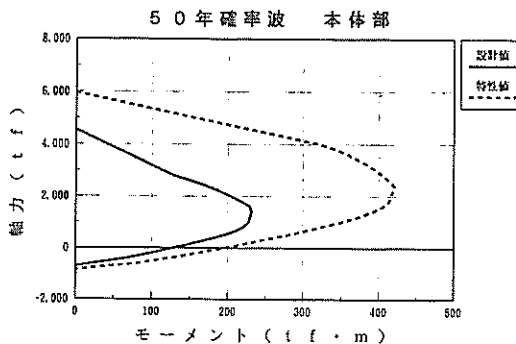


図-12 (a) 曲げモーメントと軸力の相関図 (本体部)

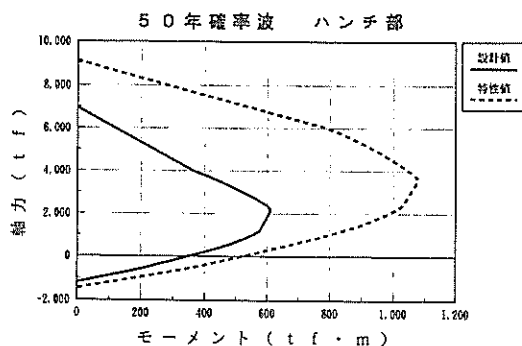


図-12 (b) 曲げモーメントと軸力の相関図 (ハンチ部)

3.2 使用限界状態の計算

半円形部材にひびわれが生じる曲げモーメント (M_c) は、プレストレス量と軸力とを考慮して以下の式で計算する。

$$M_c = Z (f_{cd} + \sigma_p + \sigma_n) \quad (10)$$

ここで Z : 部材の断面係数

f_{cd} : コンクリートの曲げ強度

σ_p : プレストレスによるコンクリートの圧縮応力度

σ_n : 軸力によるコンクリートの圧縮応力度である。

つぎに、許容最大ひびわれ幅はコンクリート標準示方書

に示される以下の式により計算する

$$W = K_1 \{4C + 0.7(C\phi - \phi)\} \sigma_s / E \quad (11)$$

ここで鋼材の増加応力度 σ_s は永久荷重 (σ_p) と変動荷重 (σ_v) による応力度を合計して $\sigma_s = \sigma_p + K_2 \sigma_v$ とする。

また W : ひびわれ幅 (cm)

K_1 : 鉄筋の付着性状の影響を表す定数

異形鉄筋 : 1.0

普通丸鋼:PC鋼材 : 1.3

K_2 : 永久荷重と変動荷重とがひびわれ幅と鋼材の腐食に及ぼす影響度の差を考慮するための定数

C : かぶり (cm)

C_s : 鋼材の中心間隔 (cm)

ϕ : 鋼材径 (cm) である。

宮崎港の半円形防波堤実証堤の部材の最大抵抗曲げモーメント、せん断耐力およびひびわれ発生曲げモーメントは表-2に示すように計算される。

4. 載荷試験の概要

4.1 試験体の構造

載荷試験に使用した試験体は半円形防波堤実証試験堤約1/3の模型で4体製作した。表-3に試験体の種類と載荷方法を示す。このうち2体は50年確率波高に対して、残り2体は2年確率波高に対して設計した。50年確

率波は通常の港湾構造物での耐用年数とし、また2年確率波は実証試験での堤体の滑動安定と部材破壊を対象にして設定した。使用限界状態では1年確率波による荷重に対するコンクリートのひびわれ幅について照査した。

今回の試験体の荷重と寸法の関係は以下の式で示される。

$$P_m / L m^2 = P_p / L_p^2 \quad (12)$$

ここで P : 荷重, L : 寸法, m : 模型および p : 実物を示す。実物と模型とで縮尺を1/3に設定すると荷重の比は1/9となる。

図-13にNo.1とNo.2試験体の形状・寸法を示す。図-14および図-15に配筋の詳細を示す。試験体の構造は半円形部がプレストレストコンクリート(PC)構造で底版部(反力壁との固定部分)が鉄筋コンクリート(RC)構造である。このためそれぞれの部材のコンクリートの設計基準強度が異なる。ただし載荷試験は半円形部材に

表-3 試験体の種類と載荷方法

試験体No.	載荷方法	設計波浪
1	外側載荷	50年確率波
2	内側載荷	"
3	外側載荷	2年確率波
4	内側載荷	"

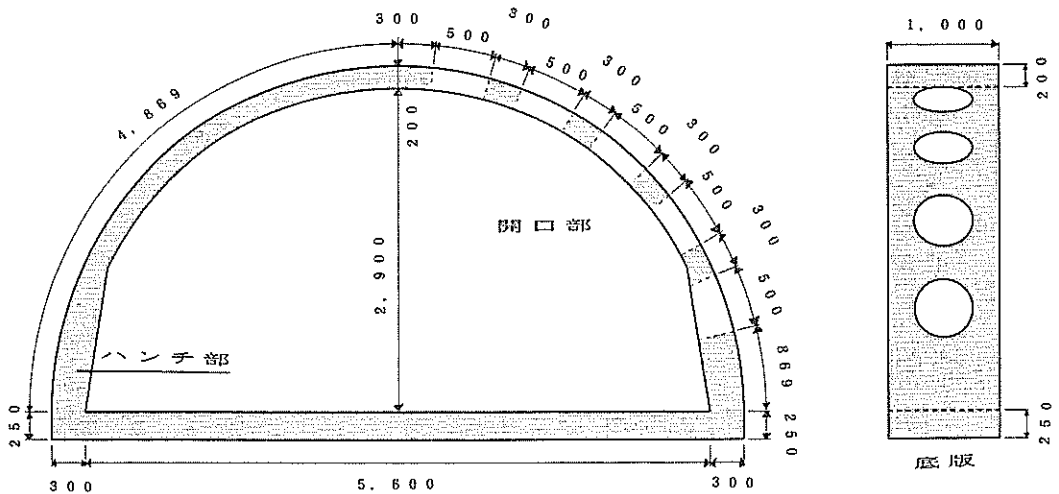
表-2 半円形部材の耐力(宮崎港実物大)

50年確率波

	標準部				ハンチ部			
	押波		引波		押波		引波	
	設計値	特性値	設計値	特性値	設計値	特性値	設計値	特性値
最大抵抗曲げモーメント(tf-m)	135.6	204.3	127.8	194.9	365.2	537.2	345.2	513.9
せん断耐力 (tf)	76.3	118.0	75.2	117.0	114.8	179.0	113.9	177.0
ひびわれ発生曲げモーメント(tf-m)	59.1	76.8	55.7	72.8	132.0	171.5	126.1	164.8

2年確率波

	標準部				ハンチ部			
	押波		引波		押波		引波	
	設計値	特性値	設計値	特性値	設計値	特性値	設計値	特性値
最大抵抗曲げモーメント(tf-m)	55.5	85.3	52.3	81.1	124.2	186.0	116.3	176.6
せん断耐力 (tf)	51.7	77.9	51.2	77.2	78.2	117.0	77.5	116.0
ひびわれ発生曲げモーメント(tf-m)	37.0	48.1	35.5	46.5	83.0	108.0	80.3	104.9

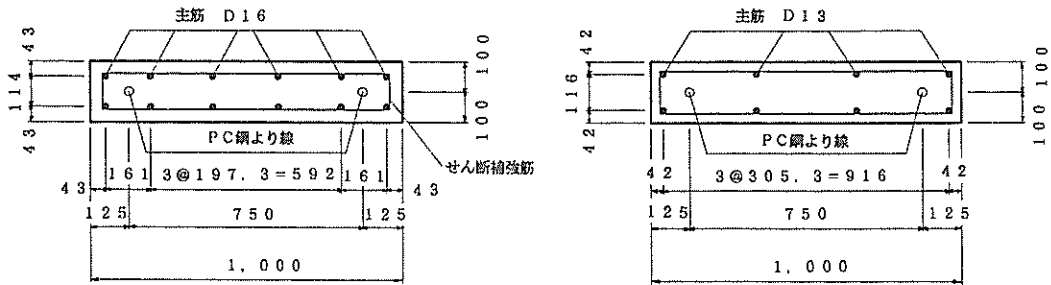


(単位 mm)

図-13 試験体の構造図

№. 1, 2 試験体

№. 3, 4 試験体



(単位 mm)

図-14 試験体の配筋図(側面図)

着目しかつ底版反力壁に固定しているので、半円形部と底版とでコンクリートの性状は同一のものを用いた。標準部(開口の存在しない部分で現地での港外側に対応)の配筋は、No. 1 及び No. 2 試験体では主鉄筋として D16 を 6 本、No. 3 及び No. 4 試験体では D13 を主鉄筋として 4 本配筋した。開口部側は、No. 1 及び No. 2 試験体では D22 を 4 本、No. 3 及び No. 4 試験体では D16 を 4 本配筋した。標準部と開口部の主鉄筋は半円形部上部で重ね継手とした。標準部ではせん断補強筋として D10 の鉄筋が 20cm 間隔に、開口側で D13 を 19-22cm 間隔に配置した。ハンチ部では D10 を 20cm 間隔に配置した。開口部周囲は D13 の鉄筋 4 本で写真-1 に示すように井桁状に補強した。鋼材とコンクリート表面までの最

小かぶりは 3 cm とした。

PC 鋼材は、規格が 1 T12.7 で各試験体とも 2 本部材断面内に配置した。この PC 鋼材は底版部で定着した。正方形の定着板の大きさは一辺の長さが 90mm 厚さが 20mm である。

試験体の断面形状は幅 100cm で、厚さは標準部で 20cm、ハンチで 30cm、底版部で 25cm とした。ここでハンチとは、半円形部材と底版部との接合箇所を半円形部材を厚くした底版から上方の長さ約 130cm 部分を指す。半円形部材の半径は、内径で 290cm である。試験体の背面(現地での港内側に対応)には直径 50cm の円形の開口部を 5 箇所設けた。背面での開口率は 23% である。

図-16 は、式(6)、(8)および(9)を用いて得られた試験体

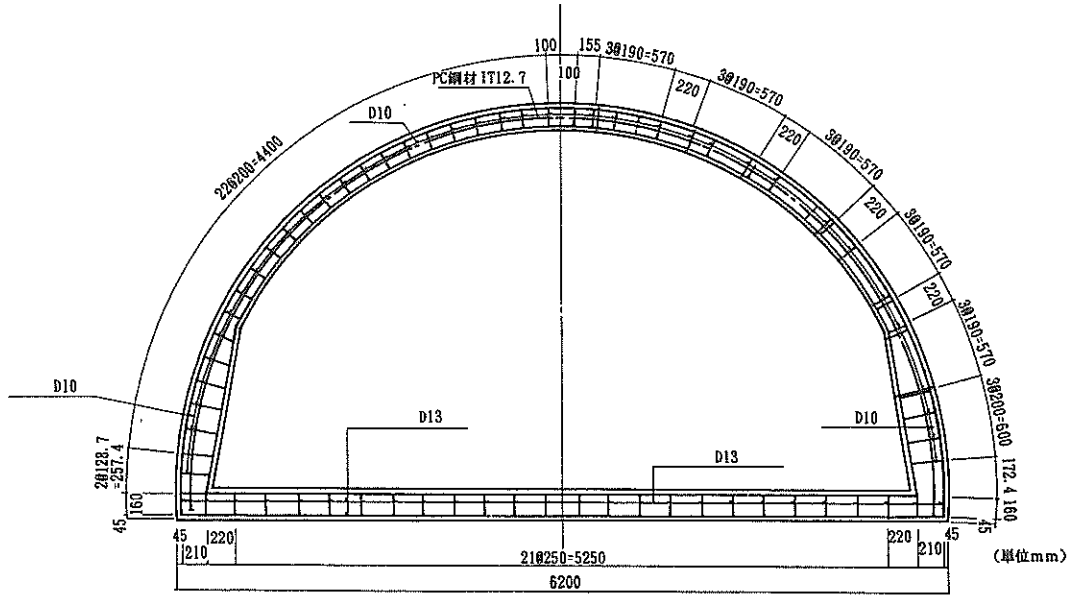


図-15 試験体の配筋図(断面図)

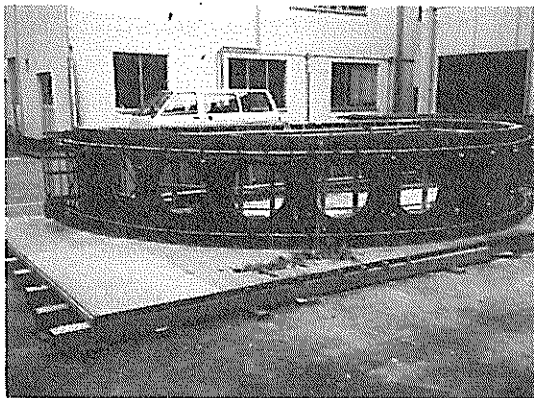


写真-2 試験体の製作状況

について断面耐荷力の軸力と曲げモーメントとの相関図である。また表-4に最大抵抗曲げモーメント、せん断耐荷力およびびわれ発生曲げモーメントを示す。

4.2 使用材料

試験体に使用したセメントは、PC導入の際に早期強度を早く発現させるため早強ポルトランドセメントである。このセメントの試験成績を表-5に示す。

細骨材は千葉県君津市法木の山砂、粗骨材は山口県美弥市伊佐の砕石を使用した。骨材の試験成績を表-6に、粒度分布を図-17に示す。粗骨材の最大寸法は20mmとした。

鉄筋の材質は、SD295である。PC鋼材は、JISG 3536 SWPR 7 B12.7mmを用いた。鉄筋及びPC鋼

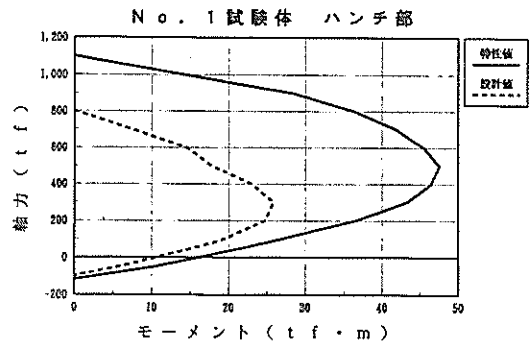


図-16 (a) 曲げモーメントと軸力の相関図(本体部)

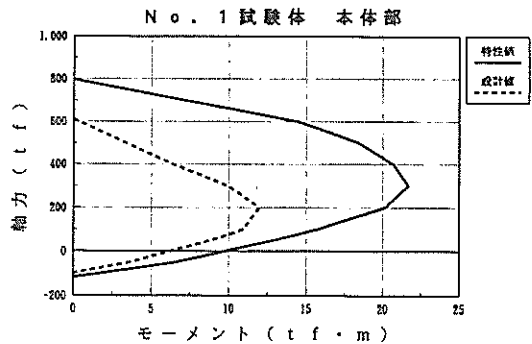


図-16 (b) 曲げモーメントと軸力の相関図(ハンチ部)

材の機械的性質を表-7に示す。

表-4 試験体の耐力

50年確率波

	標準部				ハンチ部			
	押波		引波		押波		引波	
	設計値	特性値	設計値	特性値	設計値	特性値	設計値	特性値
最大抵抗曲げモーメント(tf-m)	7.3	9.8	7.2	9.8	12.7	16.6	12.2	16.0
せん断耐力 (tf)	13.1	18.0	13.1	18.0	17.3	23.3	17.1	23.1
ひびわれ発生曲げモーメント(tf-m)	2.8	3.2	2.8	3.2	6.4	7.4	6.2	7.2

2年確率波

	標準部				ハンチ部			
	押波		引波		押波		引波	
	設計値	特性値	設計値	特性値	設計値	特性値	設計値	特性値
最大抵抗曲げモーメント(tf-m)	4.7	6.4	4.7	6.4	7.8	10.2	7.6	9.9
せん断耐力 (tf)	11.2	15.0	11.2	15.0	15.2	20.0	15.1	19.9
ひびわれ発生曲げモーメント(tf-m)	2.7	3.2	2.7	3.2	6.2	7.3	6.1	7.2

コンクリートは、設計基準強度、スラブおよび空気量が所定の目標値を満足するように示方配合を設定する。表-8にコンクリートの示方配合を示す。コンクリートの性質及び28日強度を表-9に示す。なお、中詰コンクリート（底版上に打設した重量調整用のコンクリート）及び載荷ブロックについても同様のコンクリートを使用した。コンクリートが打設される直前にスラブ、空気量及び練り上がり温度の測定を行い、配合条件を満足していることを確認した。コンクリートの締め固めは、棒状バイブレーターにより行った。

4.3 プレストレスの導入

試験体には、「プレストレストコンクリート標準示方書」に準じてプレストレスの導入を行った。プレストレスは、ポストテンション方式により導入を行った。試験体のプレストレス導入時の材令及びコンクリートの圧縮強度を表-10に示す。プレストレスト量は、部材が使用限界状態で引張応力度が生じないように設定することと、コンクリート応力に換算して試験時に約10kgf/cm²の応力度が残存する事を目標とした。実物では約20kgf/cm²のプレストレス量を導入するので、模型では相似

表-5 セメントの試験成績表

項目	比重	比表面積 (cm ² /g)	凝 結			安定性	圧 縮 強 さ (kgf/cm ²)				酸 化 マ'シム (%)	三 酸 化 鉄 (%)	強 減 量 (%)	塩 素 (%)
			水 量 (%)	始 発 (h-min)	終 結 (h-min)		1 日	3 日	7 日	2 8 日				
規格値	-	3300以上	-	60min以上	10h以下	良	65以上	130以上	230以上	330以上	5.0以下	3.5以下	3.0以下	-
試験値	3.14	4530	29.7	1-40	2-39	良	167	284	395	495	1.3	3.0	1.1	0.004

表-6 骨材の試験成績表

項目	比重	吸水量 (%)	単位容積 重量 (kgf/cm ²)	空隙率 (%)	洗い試験 (%)	有 機 不 純 物	ふるい(mm)を通過する百分率(%)						粗粒率
							5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	
細骨材	2.60	1.09	1770	31.2	1.2	合 格	93	82	74	56	25	2	2.68

項目	比重	吸水量 (%)	単位容積 重量 (kgf/cm ²)	空隙率 (%)	洗い試験 (%)	ふるい(mm)を通過する百分率(%)						粗粒率
						25	20	15	10	5	2.5	
粗骨材	2.66	0.725	1650	38.0	0.8	100	96	75	46	5	2	6.51

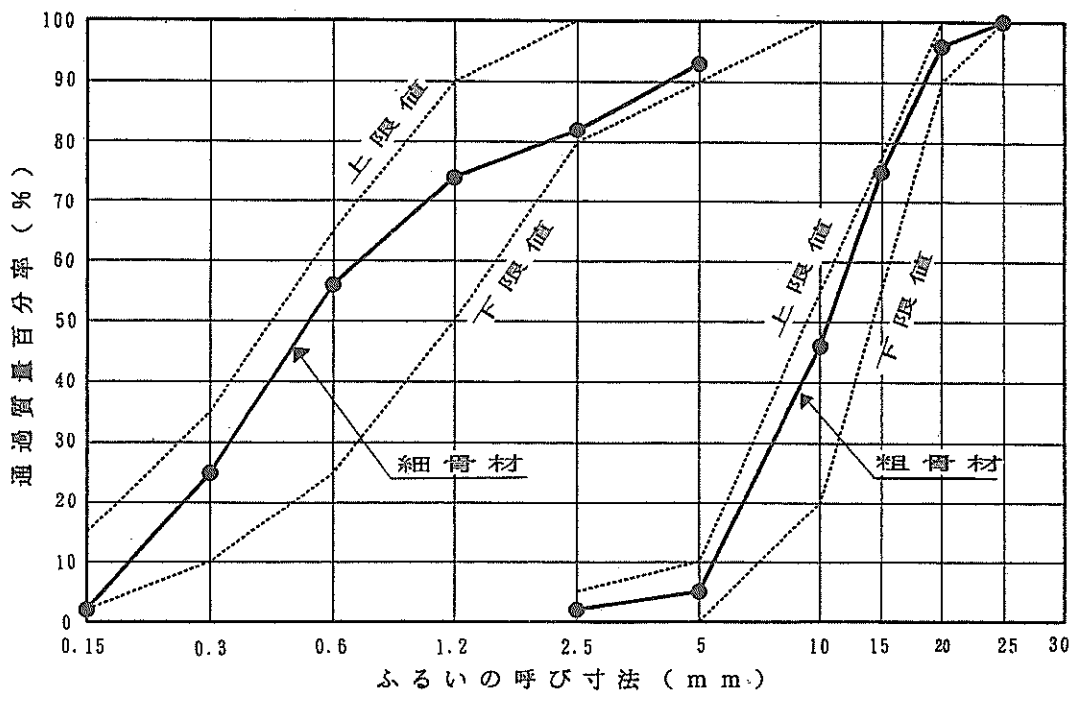


図-17 骨材の粒度分布

表-7 鋼材の機械的性質

種類	公称径(mm)	規格記号	降伏点 (N/mm ²)	引張試験 (N/mm ²)	伸び (%)	曲げ試験	化学成分 (%)				
							C	Si	Mn	P	S
鉄筋	D 1 0	SD295A	386	540	25	GOOD	21	16	76	31	24
	D 1 3	"	330	510	27	"	26	19	64	24	35
	D 1 6	"	365	502	27	"	21	17	61	39	31
	D 2 2	"	358	529	24	"	23	22	78	34	31

種類	公称径(mm)	規格記号	引張荷重 (kN)	0.2%永久伸びに 対する荷重 (kN)	伸び (%)	リラクセーション (%)	ピッチ	芯線径と側線径 との差 (mm)
P C 鋼 より線	12.7	SWPR 7B	1 9 4	1 7 7	7. 3	1. 1 4	1 3. 8	0. 1 2

表-8 コンクリートの示方配合

設計基準強度 (kgf/cm ²)	粗骨材 最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kgf/cm ³)				
						水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
3 0 0	2 0	1 2	4. 0	4 9. 5	4 3. 8	166	336	786	1,038	3.36

表-9 コンクリートの試験結果

試験体 No.	気温 (°C)	コンクリート 温度 (°C)	スランブ (cm)	空気量 (%)	材令28日 圧縮強度 (kgf/cm ²)
1, 2	12.0	14.0	12.5	4.3	409
3, 4	13.0	12.0	13.0	3.4	406

則の関係から約 2 kgf/cm² のプレストレス量を導入する必要がある。しかしこの様な小さなプレストレス量の導入は導入量の管理や精度から困難であるので試験体製作の上から 10 kgf/cm² 弱の導入量を設定した。またプレストレス導入後、試験体のシーす内にはグラウトを注

入し、P C鋼棒とコンクリートとの間で付着が保てるようにした。図-18にプレストレス導入後のコンクリートひずみの半円形部材沿いの分布を示す。No.1試験体では2.4~5.3kgf/cm²、No. 3試験体では3.7~6.4kgf/cm²のプレストレス量が半円形部材沿いに導入された。

4.4 載荷方法

載荷試験は、港湾技術研究所内の大型構造実験施設（反力壁及び反力床を用いて載荷試験を行う施設）で実施した。試験の状況を図-19に示す。また写真-3に実験場内での載荷試験の状況を示す。載荷方法は外側載荷と内側載荷がありそれぞれ2体ずつ行った。試験体は、反力床に横にして設置した。あらかじめ設けておいた取付用孔の位置でφ32mmのP C鋼棒により反力壁に固定し、反力床に載荷ブロックを試験体と10cm間隔をおいて固定した。外側載荷では試験体固定部より厚さ60cmの中詰めコンクリートを実証函での状況を考慮して打設

した。内側載荷では中詰めコンクリートは構造的に寄与しないので打設してない。底版の剛性は半円形部材と比較してかなり高いので底版を剛と考え、反力壁に模型をP C鋼棒で固定しても実際の力学現象を模型と現地で対応できると考えた。

載荷は、試験体と載荷ブロックの間にゴムチューブを入れ水圧ポンプにて膨らませ分布荷重を載荷した。載荷

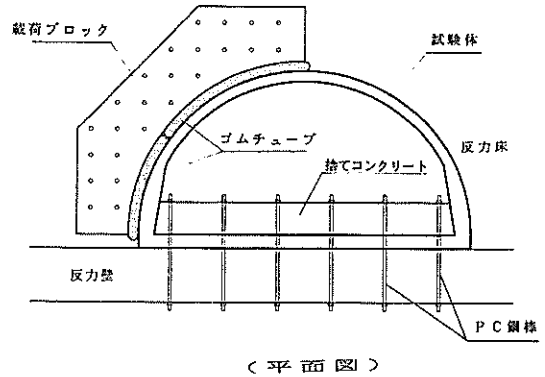


表-10 プレストレス導入時のコンクリートの圧縮強度

試験体 No.	導入時の材令 (日)	導入時のコンクリートの圧縮強度(kgf/cm ²)
1, 2	7	258
3, 4	5	251

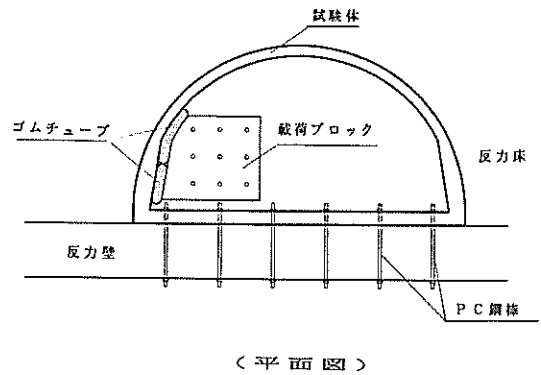


図-19 載荷実験概要図 (外側載荷)

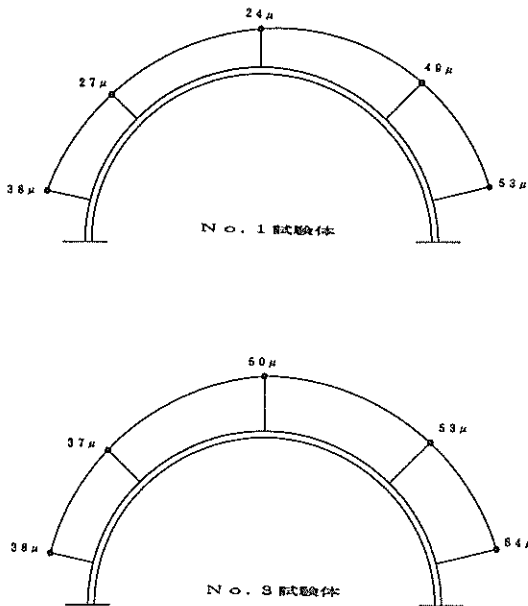


図-18 プレストレス導入後のコンクリートひずみ分布

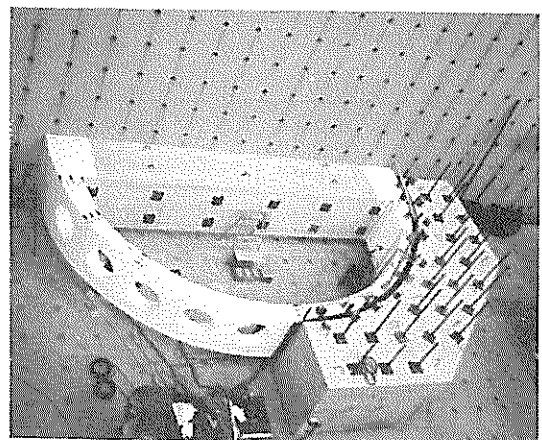


写真-3 載荷試験の状況

は、波圧分布を考慮してゴムチューブを2つに分け2種類の荷重を載荷させた。実際の波圧分布は図-5に示すようにほぼ長方形分布荷重と三角形分布荷重との和と考えられる。載荷試験ではこの形状を2個の長方形に近似させたことになる。すなわち三角形の分布荷重を直方形に面積がほぼ同じになるように換算して、これらの長方形での荷重の比率を以下のように設定した。

$$\begin{aligned} \text{外側載荷} \\ P_{r2} &= 0.8 \times P_{r1} \\ \text{内側載荷} \\ P_{r2} &= 0.5 \times P_{r1} \end{aligned} \quad (13)$$

ここで

P_{r1} : 底版側の水圧
 P_{r2} : 頂部側の水圧である。

この載荷による模型断面に生じる断面力を図-20及び図-21に示す。

載荷は、 P_{r1} を基準にして0.05~0.10kgf/cm² ずつ荷重を単調増加させた。ひびわれ発生、鉄筋降伏まで載荷し一旦除荷し残量値を計測した後、再度載荷を行った。鉄筋降伏後は、試験体の破壊と変形が進んで荷重が上がらなくなるまで載荷を続けた。

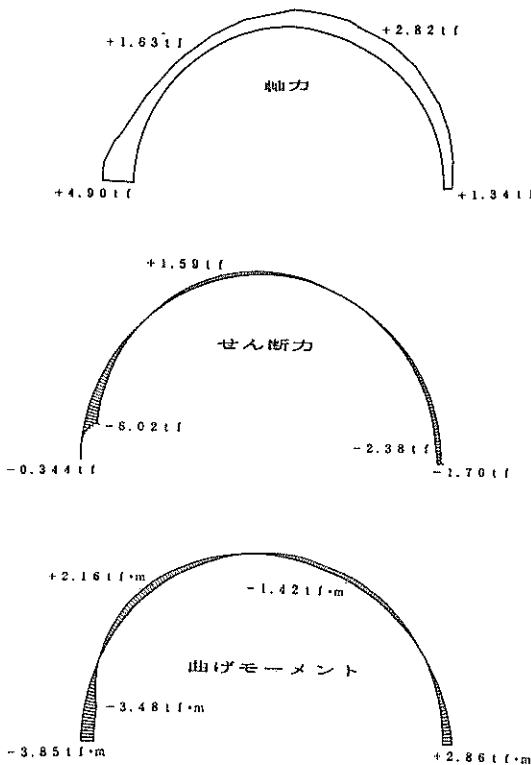


図-20 断面力分布図(外側載荷)

4.5 測定項目と測定方法

載荷試験中の測定は、荷重、変形量、鋼材のひずみ、コンクリートのひずみ、ひびわれ発生位置及びひびわれ幅について行った。表-11に測定項目及び測定に使用する計測機器を示す。

鉄筋ひずみゲージは、半円形部材の内側鉄筋と外側鉄筋に軸方向にそれぞれ2枚ずつ11ヶ所合計44枚貼り付けた。図-22に鉄筋ひずみゲージ取付位置を示す。コンクリートひずみゲージは、半円形部材の軸方向に3枚ずつ7ヶ所合計21枚貼り付けた。図-23にコンクリートひずみゲージの取付位置を示す。ひびわれ幅はパイゲージに

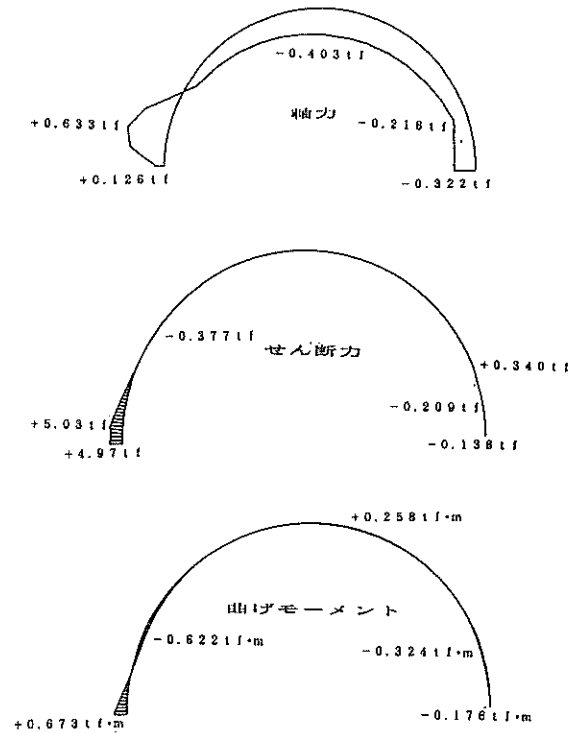


図-21 断面力分布図(内側載荷)

より測定するが、外側載荷と内側載荷でひびわれが発生すると予想される箇所に実験直前に貼り付けた。図-24にNo.1試験体とNo.2試験体でのパイゲージの取付位置を示す。試験体全体の変形を8台の変位計で測定した。変位計はH形鋼とマグネットベースにより固定した。図-25に変位計の取付位置を示す。載荷荷重の管理は、水圧をかけるゴムチューブのパイプに取り付けた圧力計で行った。

これらの計測は、各荷重段階で行いパソコンによって記憶装置に記録した。また、試験体に生じたひびわれは目視により観測し、マジックインキで試験体に直接発生

表-11 測定項目と使用機器

測定項目	測定機器	規格	合数
載荷荷重	圧力計	容量 5 kgf/cm ²	2
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 60 mm	21
鋼材のひずみ	鉄筋ひずみゲージ	ゲージ長 2 mm	22
試験体変位	変位計	ストローク 50 mm	8
ひびわれ幅	パイ型ひずみゲージ	標点距離 100 mm 容量 5 mm	24
ひびわれ及び破壊状況	目視及び写真		

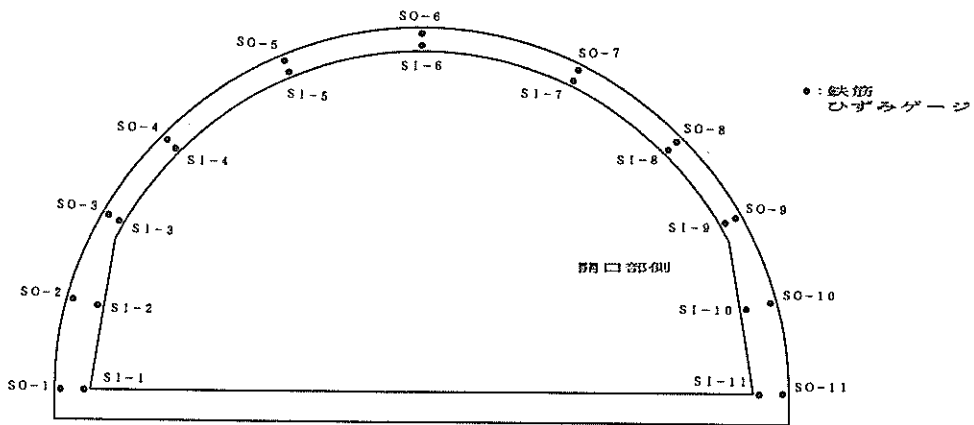


図-22 鉄筋ひずみゲージ取付位置図

荷重とともに記録した。

5. 試験結果

5.1 ひびわれの状況と破壊形式

図-26にNo.1試験体の上面でのひびわれ発生状況を示す。ここでSは半円形部材中央から載荷側へ、Nは開口側の位置を示し、数字は半円形部材中央からの升目の個数を示す。図中の升目は正方形で一辺の寸法は10cmである。

初期ひびわれは、載荷側のS41付近の部材外側表面に載荷荷重が0.48kgf/cm²のときに生じた。また開口部にもほぼ同時にひびわれが生じた。載荷荷重が0.68kgf/cm²のときS10のコンクリート表面内側と接合部内にひびわれが生じた。載荷荷重の増加にともないひびわれの本数と深度が大きくなった。終局限界状態に近づいた頃のひびわれの深度は大きいところで15-17cmであった。部材を貫通するひびわれは生じなかった。またひびわれが生じている箇所でのひびわれ間隔はほぼ10-20cmであった。半円形部材でのひびわれは、部材直交方向で

あることからほぼ曲げひびわれと考えられる。ただし接合部付近では鋼材とコンクリートの付着切れと考えられる4本の部材平行方向のひびわれが生じた。接合部内では、ひびわれ方向が斜めであるので曲げせん断ひびわれが生じていたと見られる。終局時には接合部でのひびわれが大きくなりコンクリートが剥離し始め載荷荷重が低下した。載荷終了時まで鋼材の破断は見られなかった。

図-27に開口部の部材外側表面のひびわれ発生状況を示す。ひびわれは、ほぼ部材直角方向に生じたが、開口部ではややひびわれが斜め方向に生じていた。図-26からもわかるようにひびわれ間隔は、10-20cmで開口のない側とほぼ同じであった。また開口部でひびわれ幅が急増する傾向は見られなかった。ひびわれが開口部とくに集中する傾向は見られなかったので、開口部での今回の鉄筋による補強方法が適切であることが、確認できた。

図-28にNo.2試験体の部材上面でのひびわれ発生状況を示す。初期ひびわれはS31付近の部材外側に載荷荷重が1.2kgf/cm²のときに生じた。載荷荷重が増加する

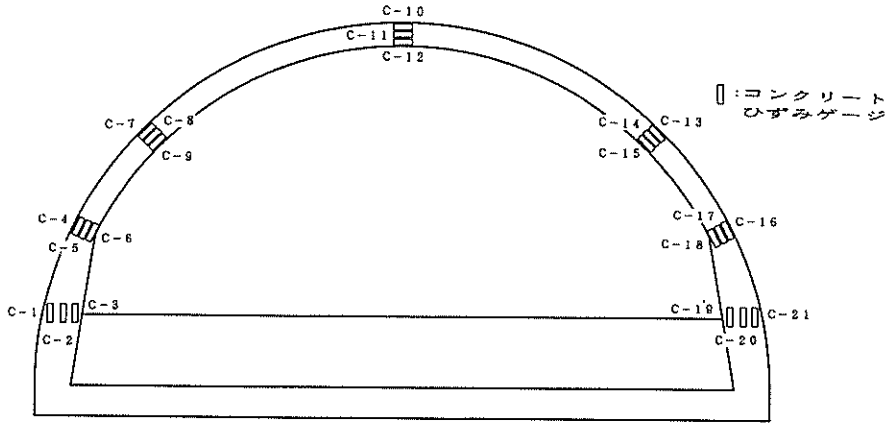


図-23 (a) コンクリートひずみゲージ取付位置図 (外側載荷)

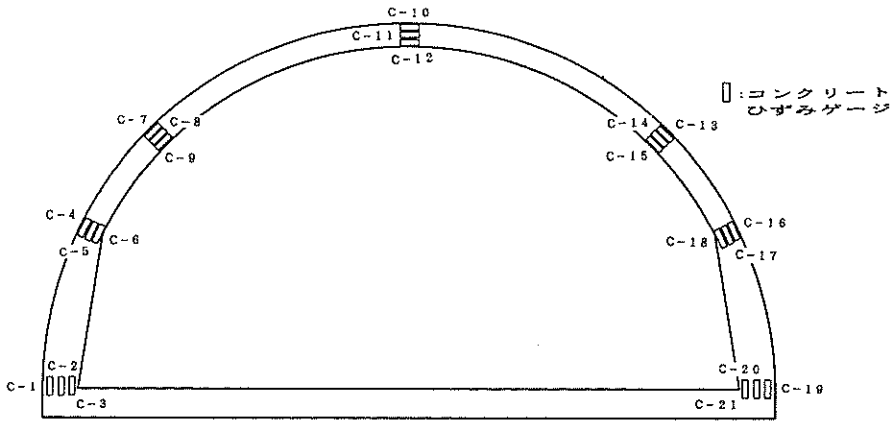


図-23 (b) コンクリートひずみゲージ取付位置図 (内側載荷)

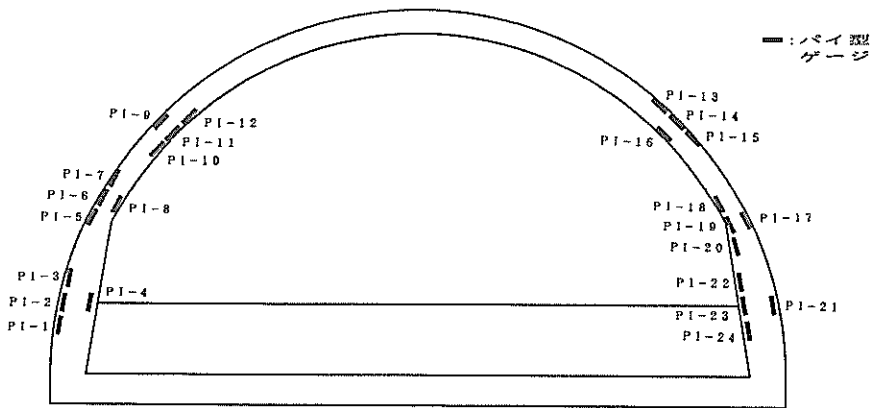


図-24 (a) パイゲージ取付位置図 (外側載荷)

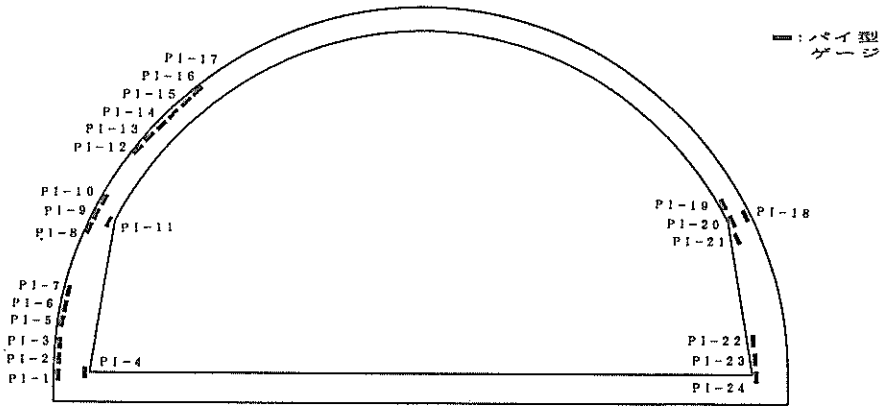


図-24 (b) パイゲージ取付位置図 (内側荷重)

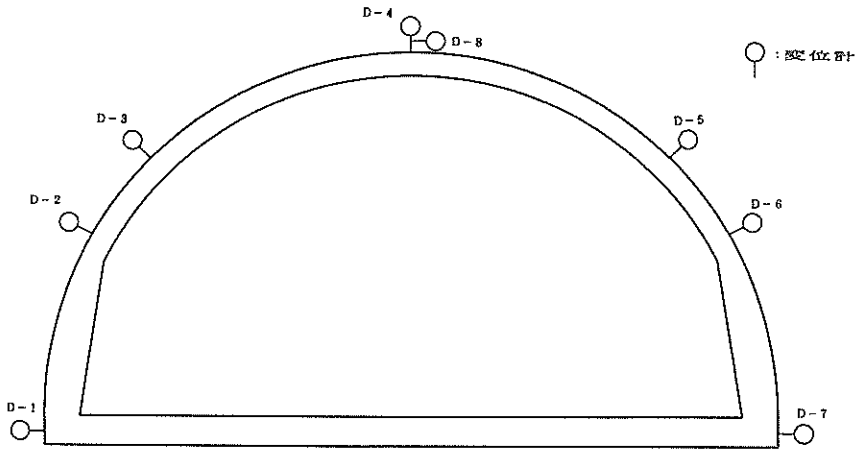


図-25 変位計取付位置図

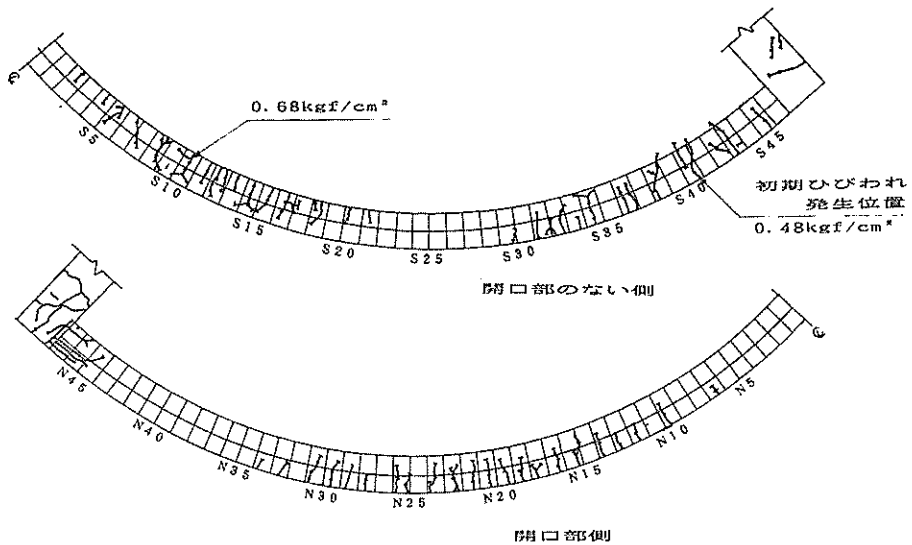


図-26 ひびわれ発生状況 (No.1試験体,上面)

に従い開口部側の内側や接合部にもひびわれが生じた。終局に近づいた頃のひびわれ間隔も10-20cmでひびわれの深度も15cm程度であった。部材を貫通するひびわれは見られなかった。半円形部材内のひびわれは部材直角方向であるので曲げひびわれが卓越したと言える。ただし載荷側の接合部付近には部材平行方向に2本のひびわれが発生しており、No.1試験体と同様に鋼材とコンクリート間の付着切れによるものと考えられた。また接合部内にかなりの曲げせん断ひびわれが生じた。終局時には半円形部材と接合部のひびわれ幅が大きくなった。

ただし定着部でのコンクリートの割裂や圧壊現象およびPC鋼材の破断は見られなかった。今回部材本体より接合部の方が破壊した。しかし、接合部で急激な破壊が生じていないのでは適切な構造細目であったと思われる。ただし、実験堤でも同様な構造細目であるが、構造設計で耐力力の照査が難しい接合部での破壊を先行させるのは望ましくないので今後再検討する必要がある。図-29に開口部でのひびわれ状況を示す。ひびわれ間隔はNo.1試験体と同じく10-20cmであった。開口部側と開口部の無い側(標準部)とで、大きなひびわれ性状の違いは

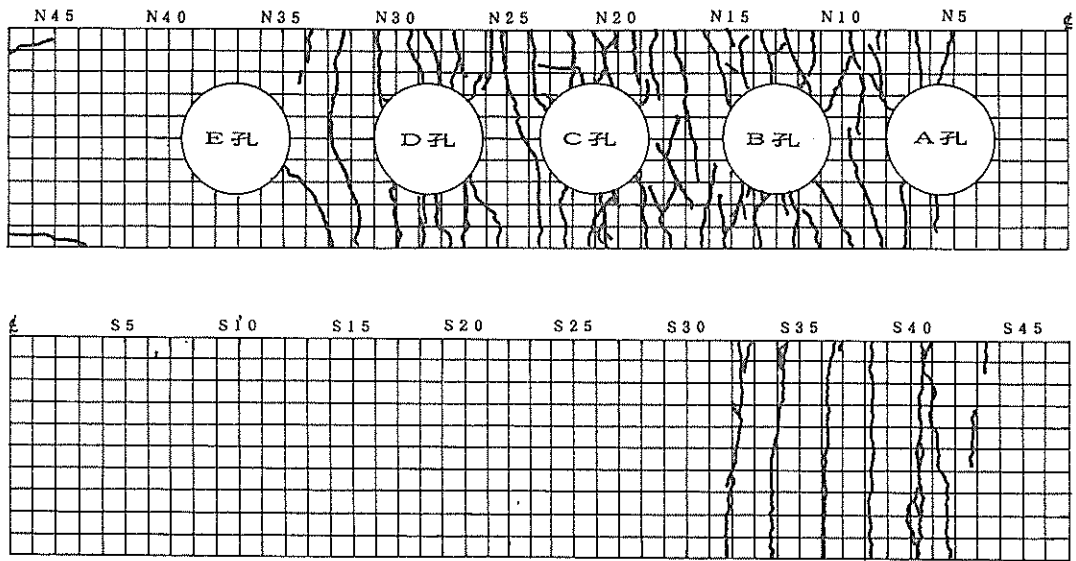


図-27 ひびわれ発生状況 (No.1 試験体,開口部)

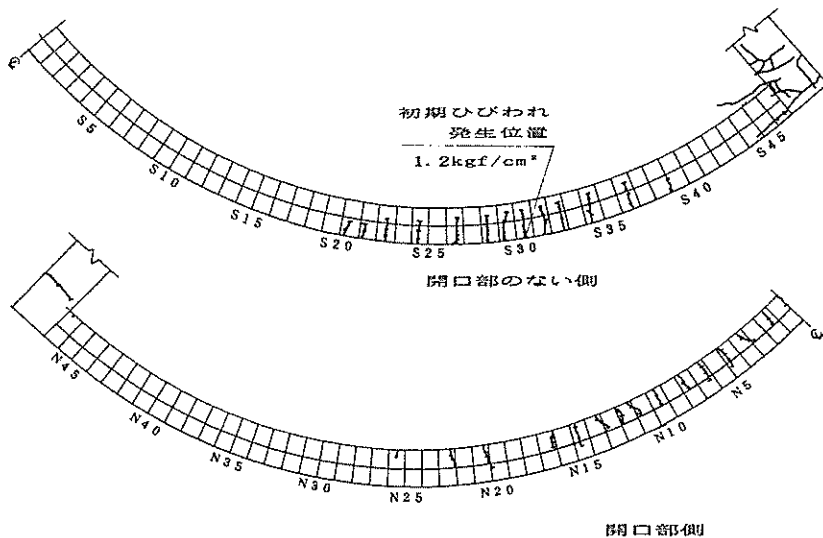


図-28 ひびわれ発生状況 (No.2 試験体,上面)

見られなかった。したがって開口部の有無がひびわれ性状に及ぼす影響は小さいと言える。

No. 3 試験体での破壊性状は、No. 1 試験体とほぼ同様であった。またNo. 4 試験体でもNo. 2 試験体と破壊性状はほぼ同様であった。

5.2 荷重と変位の関係

図-30に各試験体での荷重段階毎の半円形部材の変形状況を示す。図中の変形状況は、載荷荷重の段階毎のものを順次示したものである。外側からの載荷では載荷位置側で内側に、載荷していない開口部側では外側に荷重の増加とともに変形した。終局に近づくにつれて試験体が開口部側へ若干変形した。変形量も開口部側の方が載

荷位置側より大きくなった。接合部では変形がほとんど生じていなかった。内側からの載荷では、逆に載荷位置側では外側に開口部側では内側に変形した。変形量は載荷側の方が開口部側より大きくなった。

図-31に各試験体での荷重と変位との関係を示す。図中では変形量の大きかった変位計(図-25参照)での荷重と変位の関係を示した。No. 1 試験体では、ひびわれ発生後、荷重変位関係は次第に非線形性を示し、曲線の勾配が小さくなった。載荷荷重が 1.5 kgf/cm^2 になると鋼材が降伏した。このときの降伏変位はD-5変位計で約 20 mm であった。荷重の増加とともにさらに変位が進み終局時の変位が約 60 mm であった。従ってじん性率

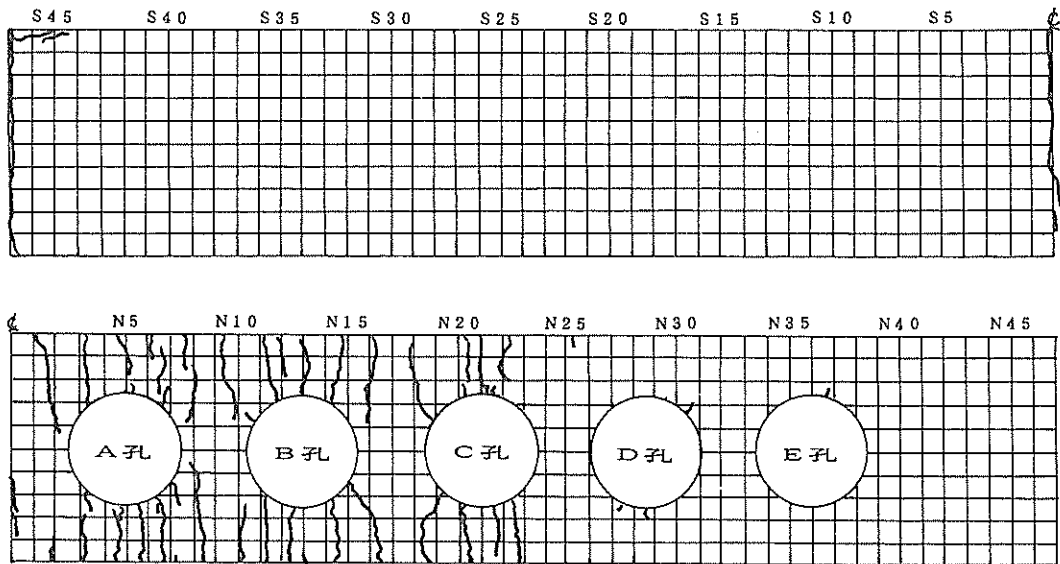


図-29 ひびわれ発生状況 (No.2 試験体, 開口部)

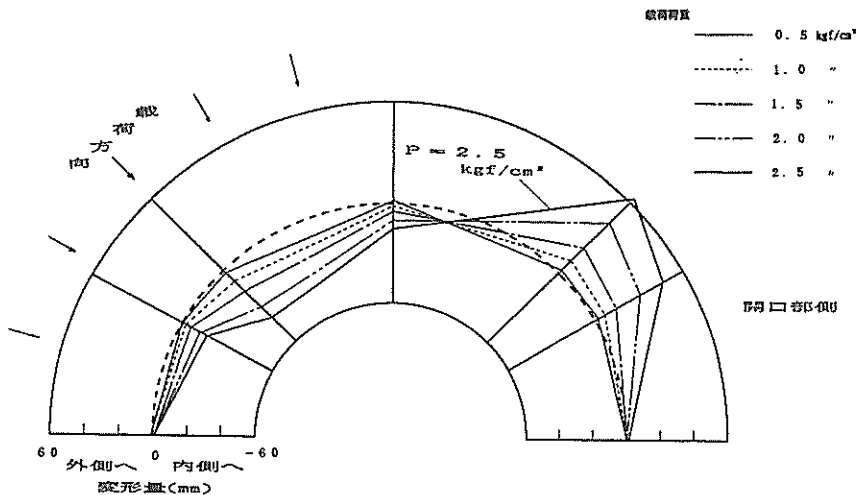


図-30 (a) 試験体の変形状況 (No.1 試験体)

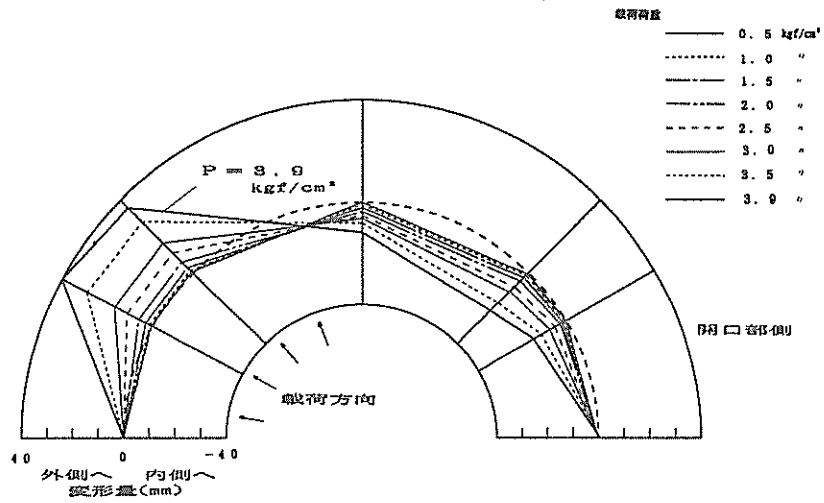


図-30 (b) 試験体の変形状況 (No.2 試験体)

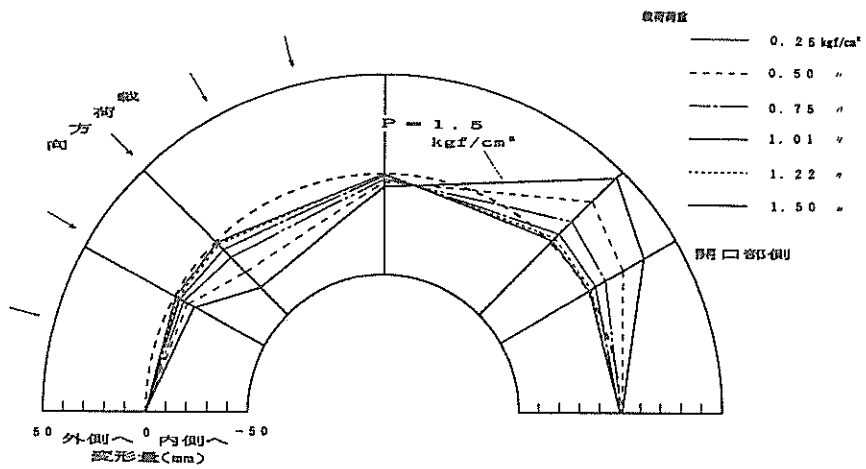


図-30 (c) 試験体の変形状況 (No.3 試験体)

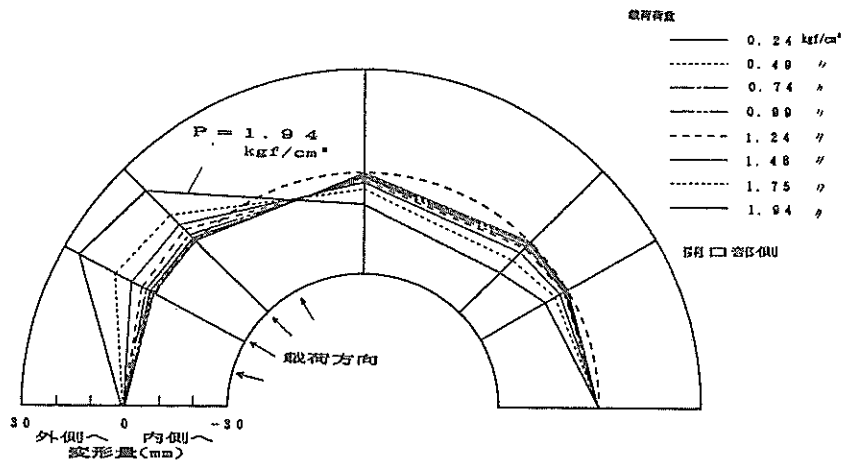


図-30 (d) 試験体の変形状況 (No.4 試験体)

(終局変位/降伏変位)は、約3であった。No. 2試験体での荷重変位関係では、荷重段階の小さい内から曲線の勾配が小さくなってきた。じん性率は約4であった。No. 3試験体では、載荷荷重が $0.5\text{kgf}/\text{cm}^2$ 位でひびわれが発生し、 $1.1\text{kgf}/\text{cm}^2$ となると鋼材が降伏した。鋼材降伏荷重はNo. 1試験体と比較して約5割小さい値となった。しかしながらじん性率は約4であった。No. 4試験体では、 $1.6\text{kgf}/\text{cm}^2$ の載荷荷重で鋼材が降伏した。これらの取りまとめを表12に示す。

5.3 鋼材とコンクリートのひずみ

図-32に各試験体での鋼材の降伏位置と載荷荷重の関

係を示す。外側載荷のNo. 1とNo. 3試験体での最初の鋼材降伏位置は、載荷側の内側の主鉄筋であった。両試験体で鋼材降伏位置はほとんど同じであった。図-32に示すとおりこの降伏位置は接合部から 67.5 度の位置であった。引き続いて接合部から 15 度のハンチ位置の外側の主鉄筋が降伏した。一方内側載荷のNo. 2とNo. 4試験体では、 30 度の位置の外側の主鉄筋が最初に降伏した。いずれの試験体でも終局までの載荷中に降伏した鋼材は、これらの位置の主鉄筋のみであった。図-33にNo. 1試験体での半円形部材の主鉄筋沿いの鋼材降伏荷重を超えたときのひずみ分布を示す。主鉄筋のひずみ分布から

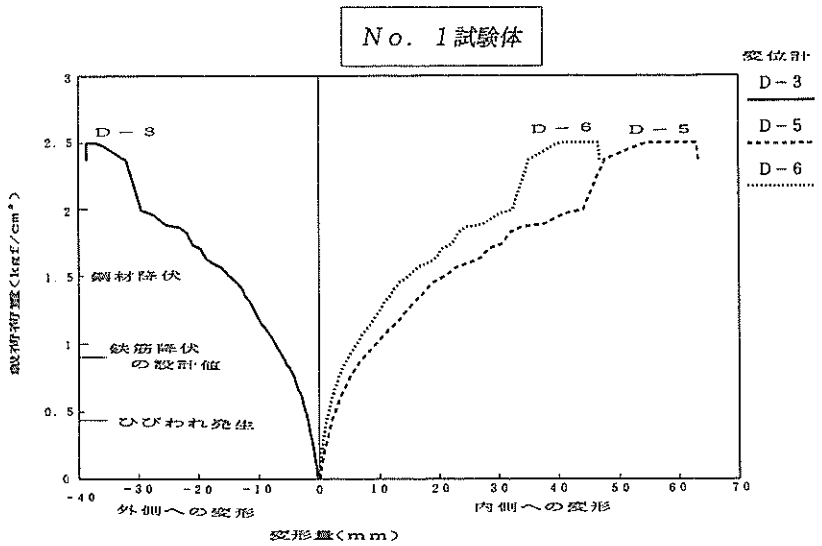


図-31 (a) 荷重-変位曲線 (No.1 試験体)

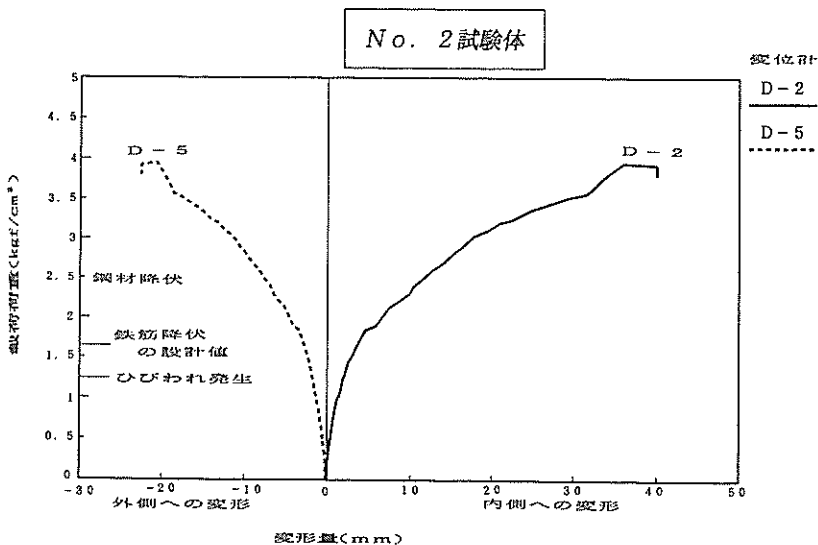


図-31 (b) 荷重-変位曲線 (No.2 試験体)

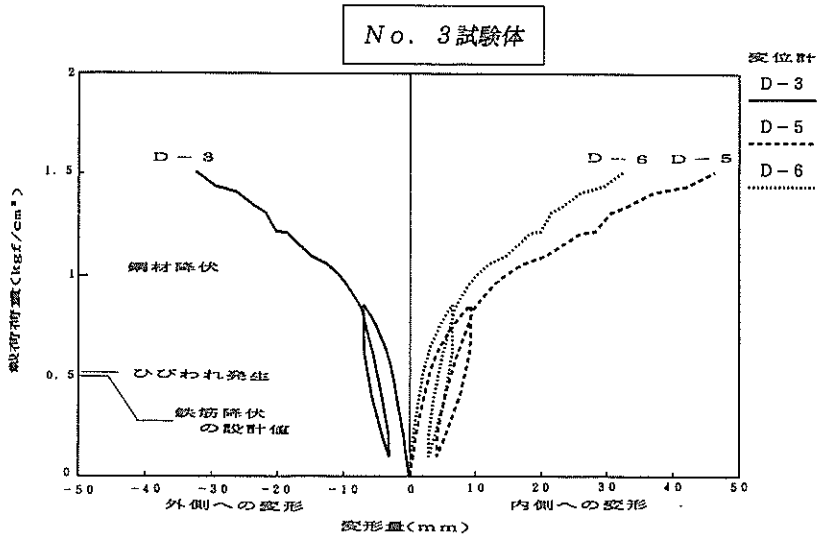


図-31 (c) 荷重-変位曲線 (No3 試験体)

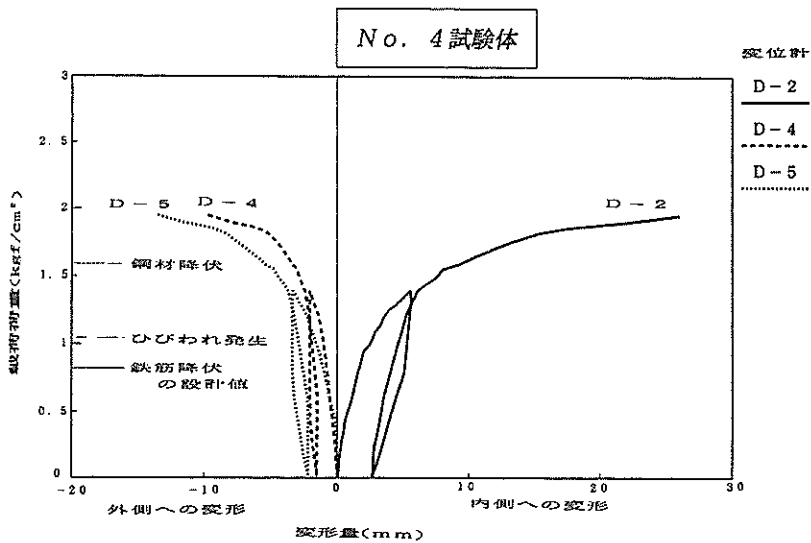


図-31 (d) 荷重-変位曲線 (No4 試験体)

ハンチ部では上側鉄筋と下側鉄筋の両者で引張ひずみが生じており部材断面に軸引張力が卓越していた。他の部分では上側鉄筋と下側鉄筋とでひずみの符号が異なっており、曲げモーメントが卓越していたことが分かる。大きな値のひずみは、半円形部材の載荷側に生じ、開口部側にはさほど大きな値のひずみは生じなかった。No. 3 試験体でもNo. 1 試験体とほぼ同様なひずみ分布であった。図-34にNo. 1 試験体の部材断面内のひずみ分布を示す。接合部から67.5度位置では、コンクリート断面の中立位置が載荷荷重の比較的小さい段階から外側へ移動し、終局時 ($P=1.81\text{kgf/cm}^2$) には外側表面より約

5 cmの位置に存在した。軸引張力がかなり部材に生じているが曲げ成分が卓越していた。図-35に示すようにハンチ内の15度の箇所では、前述したとおり軸引張力が卓越しており、中立軸は部材内に存在しなかった。この断面内にコンクリートに圧縮ひずみは生じていなかった。図-36に同じく鋼材が降伏した載荷荷重付近でのNo. 2 試験体での半円形部材沿いの主鉄筋のひずみ分布を示す。半円形部材の載荷側の外側に大きな引張ひずみが生じた。しかし、内側との鉄筋のひずみ量は小さかった。他の部分ではさほど大きな値のひずみは生じておらず、載荷箇所の方に大きな断面力が与えられた。

表-12 試験値と計算値と4比較

試験体No.	ひびわれ発生荷重 (kgf/cm ²)					鉄筋降伏荷重 (kgf/cm ²)				
	試験値	設計値	試験値/設計値	特性値	試験値/特性値	試験値	設計値	試験値/設計値	特性値	試験値/特性値
1	0.48	0.32	1.50	0.43	1.12	1.50	0.83	1.81	1.30	1.15
2	1.22	0.64	1.91	0.85	1.44	2.50	1.66	1.51	2.60	0.96
3	0.61	0.27	1.89	0.39	1.31	1.06	0.50	2.12	0.76	1.39
4	1.04	0.47	2.21	0.64	1.63	1.58	0.82	1.93	1.28	1.23

*特性値：材料の試験値を用いた計算値
 *設計値：材料の試験値を材料定数で除した値を用いた計算値

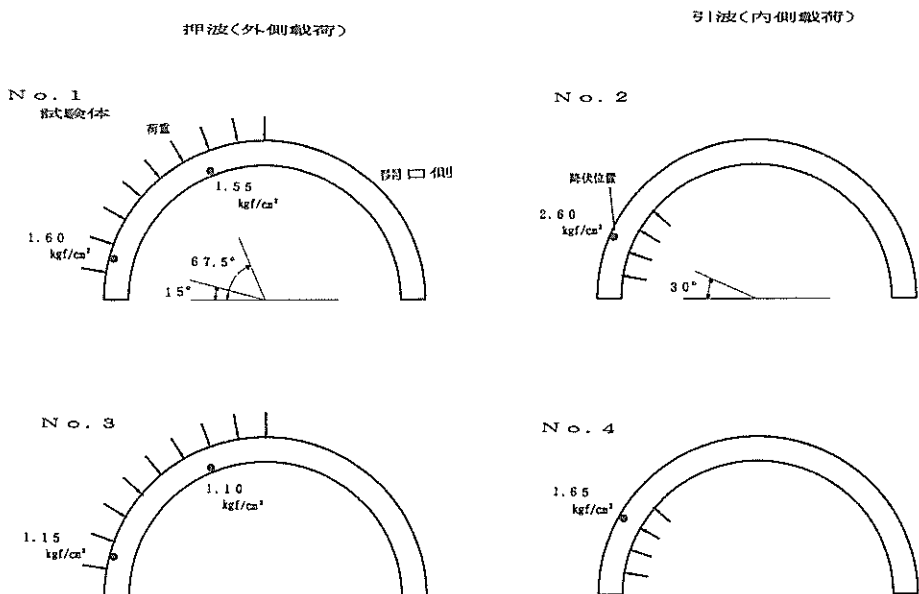


図-32 鉄筋の初期降伏位置と載荷重

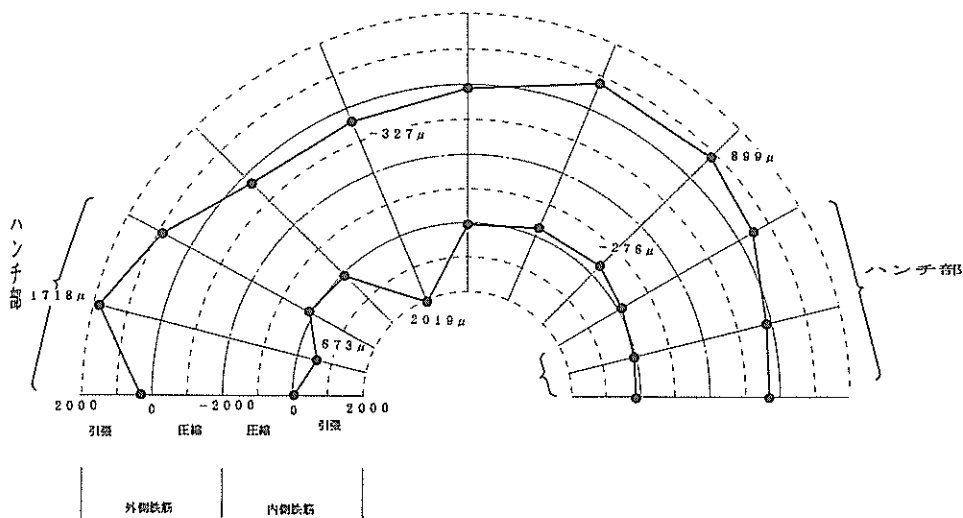


図-33 鋼材初期降伏時のひずみ分布 (No.1 試験体)

図-37にNo. 2 試験体での30度の位置での部材断面内のひずみ分布を示す。載荷荷重の増加とともに中立軸は外側に移動した。終局時には中立軸がほぼ外側表面に達しほとんど全断面が引張状態となった。No. 4 試験体でのひずみの分布状況はNo. 2 試験体とほぼ同様であった。

5.4 ひびわれ幅

図-38にNo. 1 試験体での載荷荷重とひびわれ幅の関係を示す。図-24に示すようにP I - 1 からP I - 6 までのパイ型ゲージは半円形部材ハンチ部の載荷側の外側表面に取り付けたものであり、載荷中にかんがりのひびわれが生じた箇所である。載荷荷重が 0.66 kgf/cm^2 のときにこの位置で初期ひびわれが発生し、載荷荷重の増加とともにひびわれ幅は増加した。載荷荷重が約 1 kgf/cm^2 を超えるとひびわれ幅が 0.2 mm 以上となった。ただし、(-) のひびわれ幅はコンクリートの圧縮ひずみを示しておりひびわれを計測したものではない。 0.2 mm

のひびわれ幅は使用限界状態での許容ひびわれ幅に相当する。図-39にNo. 2 試験体での載荷荷重とひびわれ幅の関係を示す。P I - 8 を除くP I - 7 からP I - 12 までのパイ型ゲージは載荷側の半円形部材外側に取り付けたものである。この場合にはひびわれ幅は載荷荷重が増加してもあまり広がらずひびわれが分散した。鋼材降伏荷重近くなりひびわれ幅が 0.2 mm を超えた。

6. 計算値と試験値との比較

表-12に計算値と試験値との比較を示す。この表で特性値と表記したものは、鋼材とコンクリートの強度を材料強度試験から得られた値を用いて計算したもので、設計値と表記したものは材料強度試験で得られた値を材料係数で除して得られた値を用いて計算したものである。ひびわれ発生荷重に対する試験値と特性値の比(試験値/特性値)は、 $1.12 \sim 1.63$ の範囲であった。また試験値

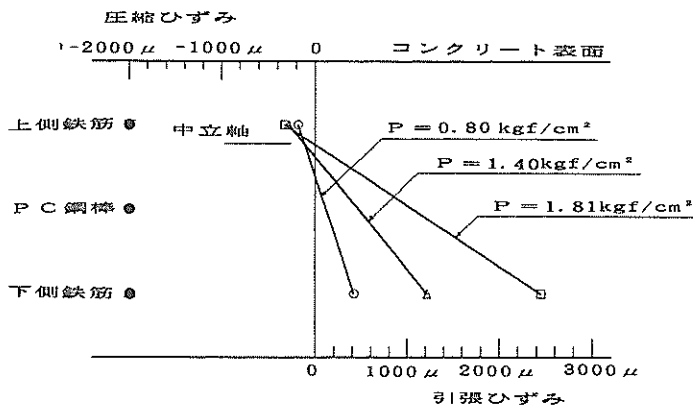


図-34 部材断面内のひずみ分布 (67.5°)

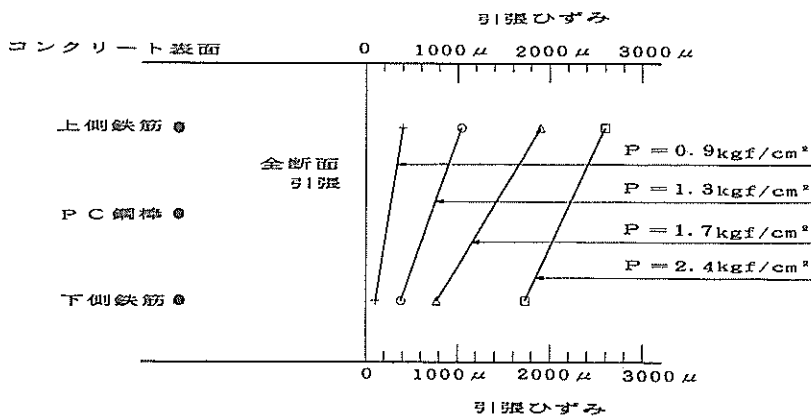


図-35 部材断面内のひずみ分布 (15°)

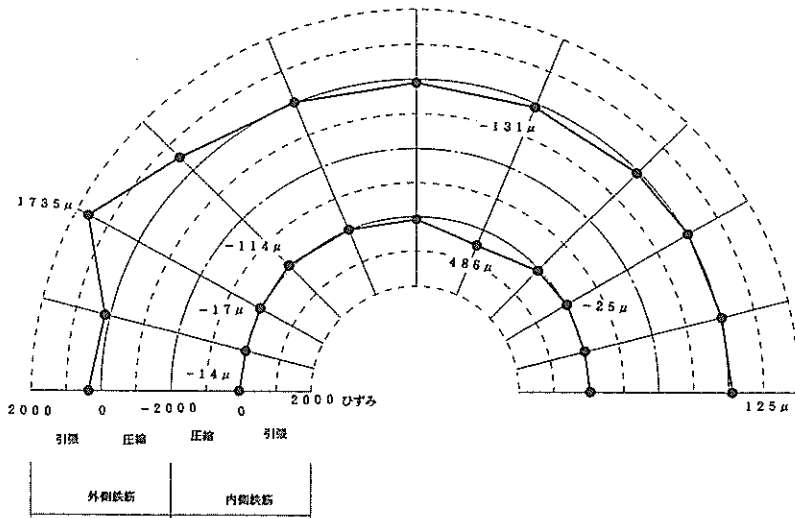


図-36 鋼材初期降伏時のひずみ分布 (No.2 試験体)

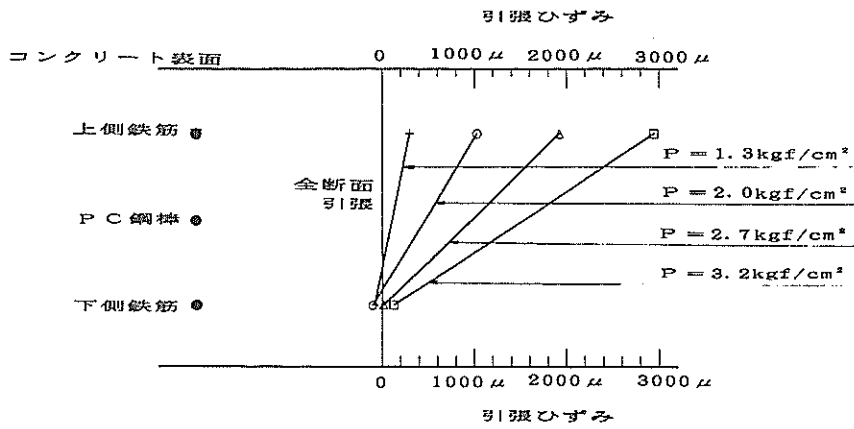


図-37 部材断面内のひずみ分布 (30°)

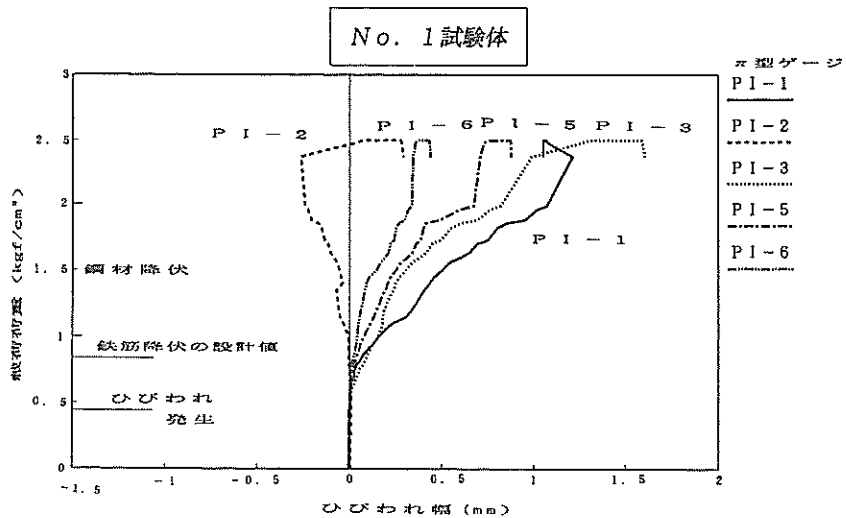


図-38 載荷荷重とひびわれ幅 (No.1 試験体)

と設計値の比は1.50-2.21であった。試験結果と計算値を比較すると、載荷重に対するひびわれの発生に対する余裕はかなりあると言える。鋼材の降伏に関しては試験値と特性値の比が0.96-1.39の範囲であり限界状態設計法により半円形部材の耐荷力の推定がかなり精度良くできることが分かった。

終局限界状態での波力の荷重係数を、現在、プレストレストコンクリート港湾構造物設計指針(案)¹⁰⁾で暫定的に1.5に設定している。この荷重係数を考慮すると試験値と設計値の比は2.34-2.87となる。すなわち想定している波力(特性値)に対してはほぼ3倍弱の安全率を半円形部材が保有していると言える。またコンクリート標

準示方書での荷重係数は波力を1.2と設定している。コンクリート標準示方書に従えば安全率はこの値よりも小さくなる設計となる。ただし図-38と図-39に示すように設計値での載荷重段階では鋼材は降伏せずひびわれが若干発生する状態である。現地では設計波力が襲来したとしても直ちに部材の破壊にいたらないと言える。一方、波力の荷重係数については、車両荷重などの変動荷重より不確定要素が大きくまた海底の地形、構造物の規模形式などにより影響を受けると考えられており現在係数の設定に関して検討が進められている¹¹⁾。

図-40にNo. 1試験体でのひびわれ幅と鉄筋ひずみの関係を示す。この関係は載荷側のハンチ部付け根での

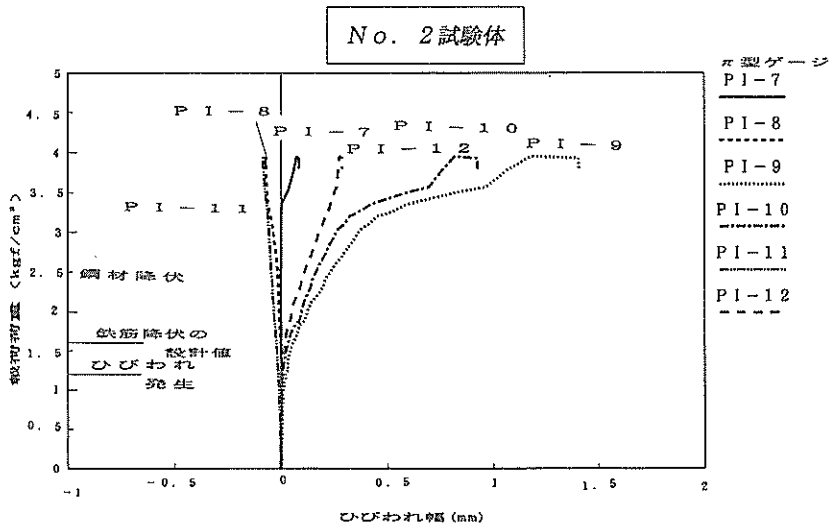


図-39 載荷荷重とひびわれ幅 (No.2 試験体)

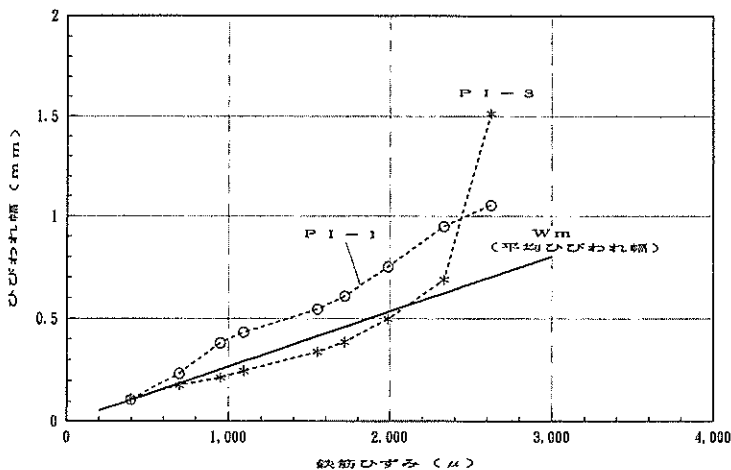


図-40 ひびわれ幅と鉄筋のひずみ

鋼材のひずみとひびわれ幅との関係を整理して得たものである。図中に式(11)で得られる計算値も合わせて載せてある。同図から分かるように、今回の半円形部材でも従来言われてきているように鋼材のひずみ量とひびわれ幅との関係がひずみ量が 2500μ 以内ではほぼ比例した。部材断面に軸引張力が作用する場合には、従来の曲げのみによるひびわれより大きなひびわれ幅になると言われている。今回の試験でもハンチ部ではこの傾向がうかがわれるのでひびわれ幅の制限については十分な注意が必要である。このため必要量のプレストレスト量の導入と鋼材の径、間隔などの配置方法、かぶり厚さに配慮が必要である。

7. 結論

今回の載荷試験および解析から以下の主要な結論を得た。

- ① 外側からの載荷では、半円形部材の基部より45度付近で曲げ破壊が卓越した。また内側からの載荷でも曲げひびわれが卓越した。載荷試験中にコンクリートの圧壊や鋼材の破断はみられず、終局状態では鋼材の伸びが大きくなった。終局状態では接合部での部材間の剥離が顕著となった。開口部での顕著なひびわれの発生は認められず、開口部の周囲に井桁状に鉄筋を配置した補強方法は適切と考えられる。
- ② 鉄筋降伏荷重に関して、試験結果と限界状態設計法での終局限界の計算結果との比(試験値/特性値)は0.96-1.39であった。ひびわれ発生荷重の比は、1.12-1.63であった。したがって、限界状態設計法の方法で比較的良く鉄筋降伏荷重を推定できるが、ひびわれの発生荷重に対してはやや両者の差が大きかった。
- ③ 今回の試験結果より現地での実証函での状況を推測すると、設計で考慮している50年確率波が到達したとき、ひびわれが若干発生する程度であり鋼材は降伏せず部材は十分保有耐力があると言える。
- ④ 半円形部材でひびわれが発生しやすいハンチ部分では、部材断面に軸引張力が卓越する。試験でのひびわれ幅は、コンクリート標準示方書に示されている曲げひびわれを対象として得られる設計式による計算結果と傾向は一致しているが値そのものはやや大きくなった。

あとがき

本研究は第四港湾建設局からの依頼により行われたものである。半円形防波堤の設計施工、実証試験に関する諸問題は沿岸技術開発研究センターの委員会(委員長、

谷本埼玉大学教授)により検討されている。今回の試験研究を行う上で各委員から貴重なご意見を頂いている。また実験、図面整理などに関して、構造強度研究室の山田昌郎研究官、伊藤洋平君の協力を得た。ここに関係各位に深甚なる感謝の意を表す。今後実証試験での現場観測記録の解析、繰り返し荷重に対する半円形部材の強度特性などの検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 谷本勝利, 他4名: 半円形防波堤の開発について, 海洋開発論文集, Vol.3, 1987年, pp.7-12
- 2) 谷本勝利, 他4名: 曲面スリットケーソンの水理特性に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第19巻第4号, 1981年, pp.3-53
- 3) 清宮 理, 白崎正浩: 円筒型波浪制御構造物の構造開発, 土木学会第43回年次学術講演会, PSV-23, 昭和63年10月, pp.46-47
- 4) 清宮 理, 横田 弘: 半円形構造部材の耐力評価, 港湾技研資料, No.538, 1985年12月, 52p
- 5) 清宮 理, 横田弘: 曲面部材の非線形解析, 港湾技術研究所報告, Vol.24, No.1, 1985年3月, pp.69-131 (英文)
- 6) 清宮 理, 白崎正浩, 横田 弘: 多数の開口を有するコンクリート円筒壁の力学性状, 港湾技研資料, No.690, 1990年12月, 33p
- 7) 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12月, 40p
- 8) 谷本勝利, 滑川伸孝, 石丸敬純, 関本恒浩: 半円形ケーソン堤の水理特性に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告第28巻第2号, 1989年6月
- 9) 土木学会: コンクリート標準示方書, 平成3年度版, 設計編, 206p
- 10) 運輸省港湾局建設課: プレストレストコンクリート港湾構造物技術調査報告書(設計指針案), 昭和56年3月, 127p
- 11) 高山知司: 信頼性理論による防波堤滑動の安定性に関する検討, 海岸工学論文集, 第36巻, 1989年, pp.673-677

港湾技研資料 No.759

1993・9

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 侑つばさ印刷技研

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

Copyright © (1993) by P.H.R.I

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted 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。