

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1030

September 2002

曲面外壁を有するハイブリッドケーソンの構造性能に関する検討

横	田	弘
山	田	昌郎
岩	田	節雄
田	中	洋
松	野	進
祐	保	芳樹

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan



目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
2. 曲面版ハイブリッドケーソンの特徴	4
3. ハイブリッド曲面版の強度特性	5
3.1 概 要	5
3.2 分布荷重に対する強度特性	5
3.3 集中荷重に対する強度特性	10
4. 曲面版ハイブリッドケーソン全体系の強度特性	14
4.1 曲面版の強度に及ぼす曲率半径の影響	15
4.2 フーチングの剛体判定	17
5. 実物大部分模型施工試験	19
5.1 鋼板の曲面加工と補強	19
5.2 コンクリートの配合および打設性	21
5.3 コンクリートの温度・ひずみ計測	21
5.4 圧力負荷試験	23
6. 防波堤ケーソンとしての試設計	23
6.1 検討条件	23
6.2 検討方針	24
6.3 試設計結果	24
7. 結 論	27
謝 辞	27
参考文献	27
付 録	28

New Type Breakwater Caisson using Steel-Concrete Composite Curved Shell Panel

Hiroshi YOKOTA*
Masao YAMADA**
Setsuo IWATA***
Hiroshi TANAKA***
Susumu MATSUNO***
Yoshiki SUKEYASU***

Synopsis

A breakwater caisson composed of steel plate - concrete hybrid members will exhibit excellent mechanical performances that are characterized by high load-carrying capacity and rigidity. By taking these advantages, it is realized to become lightweight of caisson, which contributes to enlargement of a structure and reduction of ground reaction forces.

This paper proposes an advanced type of breakwater caisson by using cylindrically curved hybrid shell members. Applying curvature to outer walls of caisson contributes to much higher load carrying capacity particularly at the joint between the outer wall and footing. This technique may further improve the durability and construction cost of a breakwater caisson. The verification of these features was undertaken based on the following sub-studies:

- 1) Load-carrying capacity of hybrid cylindrical panel
- 2) Structural performance of the new type breakwater
- 3) Construction method
- 4) Comparison with conventional breakwater through practical designs for model breakwaters

Hybrid curved-members demonstrated higher ultimate strength and toughness than conventional ones. An execution test on a prototype caisson model confirmed to form curved panels without any difficulties. Furthermore, comparison with conventional breakwater was also made through trial design, which indicated that the newly proposed breakwater caisson is effective to reduce construction cost.

Key Words: breakwater caisson, hybrid structure, perfobond rib, cylindrically curved shell panel, execution

* Head of Structural Mechanics Division, Geotechnical and Structural Engineering Department

** Ex-Senior Research Engineer of Structural Engineering Division, PHRI (present Kyusyu Regional Development Bureau)

*** Hitachi Zosen Corporation

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone: +81-468-44-5059, Fax: +81-468-44-0255, e-mail: hiroy@pari.go.jp

曲面外壁を有するハイブリッドケーソンの 構造性能に関する検討

横田 弘*
山田 昌郎**
岩田 節雄***
田中 洋***
松野 進***
祐保 芳樹***

要 旨

鋼・コンクリートハイブリッド構造は、高強度、高じん性などの優れた力学性能を有している。そのため、これを用いた港湾用ケーソンは、高耐力化や軽量化が可能である。特に、この軽量性を活かして、基礎地盤への影響を軽減できることなどから、建設事例が近年増加しつつある。本研究では、ハイブリッドケーソンのさらなる構造の合理化を図ることを目的として、外壁およびフーチング部に曲面形状を採用したハイブリッドケーソン（曲面版ハイブリッドケーソン）を考案した。この構造様式の防波堤ケーソンへの適用性を、主に次の4項目に関する数値解析、載荷試験および施工試験をとおして考察した。

- 1) ハイブリッド曲面版の強度特性の評価
- 2) 曲面版ハイブリッドケーソンの構造特性の評価
- 3) 実物大部分模型による曲面版ハイブリッドケーソンの施工性と強度の評価
- 4) 鉄筋コンクリート（RC）ケーソンとの経済性の比較

その結果、ハイブリッド曲面版は、ハイブリッド平面版やRC平面版と比較して、さらに耐力とじん性に優れていることが明らかとなった。実物大部分模型施工試験では、曲面壁が問題なく、かつ比較的容易に施工できることを確認した。また、試設計によるRCケーソン防波堤との比較検討を行い、防波堤の建設費を低減できる可能性があることを示した。

キーワード：ハイブリッドケーソン，防波堤，曲面版，孔あき鋼板リブ

* 地盤・構造部 構造強度研究室長

** 前港湾技術研究所主任研究官（現・国土交通省九州地方整備局下関港湾空港技術調査事務所副所長）

*** 日立造船株式会社

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人 港湾空港技術研究所
電話：0468-44-5059 Fax：0468-44-0255 e-mail: hiroy@pari.go.jp

1. まえがき

鋼板と鉄筋コンクリートを合成した平面版部材により構成されるハイブリッドケーソン（以下、従来型ハイブリッドケーソンと称す）は、その優れた力学性能¹⁾と軽量性の観点から岸壁、護岸、防波堤などの港湾構造物に適用される事例が増加している。また、その設計および施工方法は、ハイブリッドケーソン設計マニュアル²⁾としておおむね確立されている。

従来型ハイブリッドケーソンは、これまで内海の港湾施設に適用されることが多かったが、港湾施設の大型化に伴い、さらに苛酷な海象条件下にある外洋や軟弱地盤上への適用が求められつつある。そこで、本研究では、従来型ハイブリッドケーソンの構造強度をさらに向上させる試みとして、外壁とフーチング部にハイブリッド曲面版構造を取り入れた曲面版ハイブリッドケーソンを考案した。しかし、ハイブリッド曲面版の強度特性は十分に解明されておらず、合理的な施工方法も確立されていない。そこで、ハイブリッド曲面版の強度特性と、それを使用したハイブリッドケーソンの設計・施工方法に関して、主に次の4項目の検討を行った。

① 荷重載荷試験とFEM解析によるハイブリッド曲面

版の強度特性の検討

- ② FEM解析による曲面版ハイブリッドケーソン全体の構造特性の検討
- ③ 実物大部分模型による施工方法の検討
- ④ 試設計による従来型ハイブリッドケーソンとの比較検討

本資料では、これらの結果について述べ、曲面版ハイブリッドケーソンの有利性を明らかにした。また、曲面版ハイブリッドケーソンの設計・施工の際の利便性を考え、既存の設計マニュアル²⁾を曲面版ハイブリッドケーソンに適用するために必要となる事項について考察を加え、付録にとりまとめた。

2. 曲面版ハイブリッドケーソンの特徴

平らな版に曲率を持たせて曲面に成形すると、元の平らな版よりも曲げに対する剛性と強度が高くなることは、周知の事実である。曲面版ハイブリッドケーソンは、この曲面効果を荷重作用の影響を最も受け易い外壁およびフーチング部に活用したケーソンである。全体構造の概要を図-1に示す。フーチング部および外壁部が円筒曲面状の鋼・コンクリートハイブリッド版構造となっている。

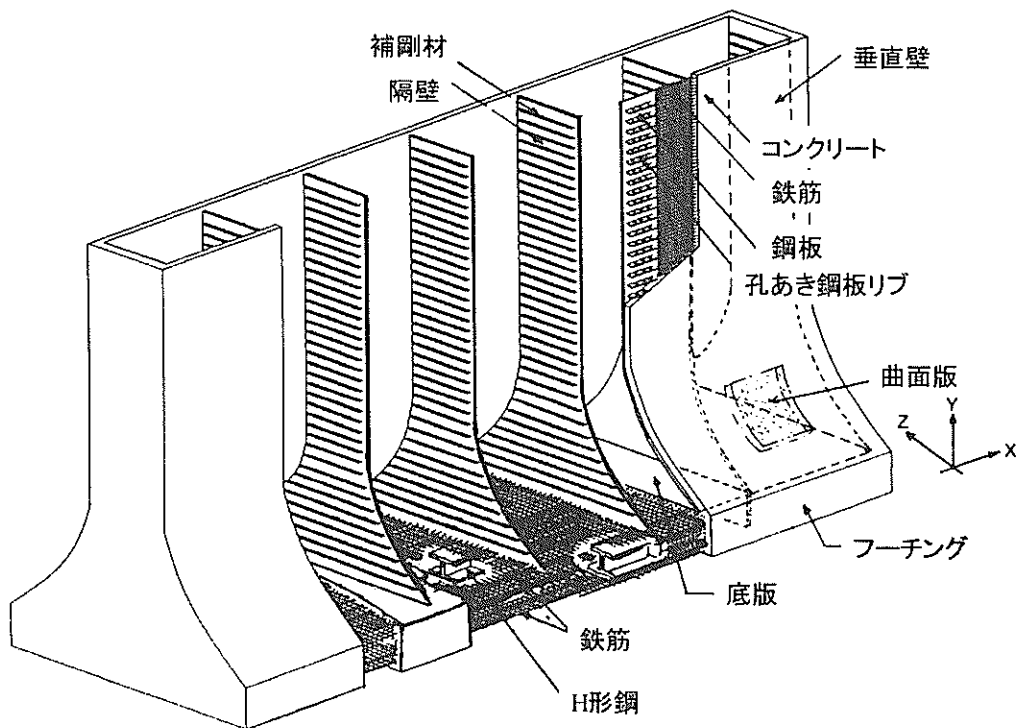


図-1 曲面版ハイブリッドケーソンの構造概要

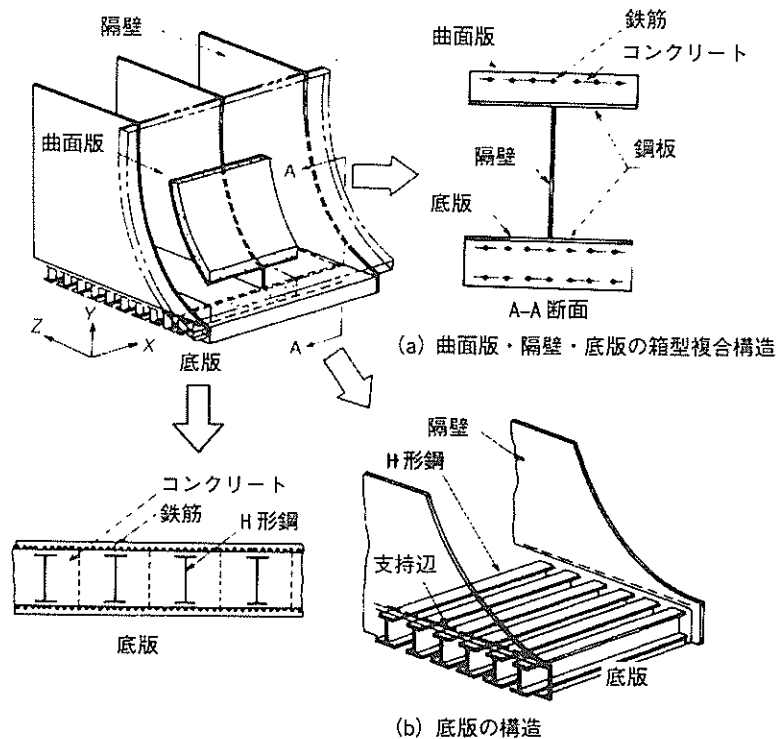


図-2 曲面版ハイブリッドケーソンの特徴

図-2では、底板は鉄骨を組み入れたSRC構造、ケーソン内部の隔壁は補剛板を設けた鋼構造としている。しかし、底板および隔壁の材料および構造は、これらに限らず様々な様式の採用が可能である。

曲面版ハイブリッドケーソンでは、外壁を曲面化することによってケーソン全体をシェル構造化することができる。また、従来型ハイブリッドケーソンのフーチング部は、1枚のハイブリッド版あるいはSRC版による単位幅あたりの片持ちばりとして設計される²⁾。それに対して、曲面版ハイブリッドケーソンのフーチング部は、図-2(a)に示したように、底板と曲面外壁を上下フランジとする箱型複合構造として設計することになる。これらのことから、従来型ケーソンと比較して、外壁およびフーチング部の強度および剛性が向上する。特にフーチングの性能向上の点から見れば、フーチングの長さをより大きくできることにつながる可能性がある。その結果、ケーソン本体の転倒に対する安定性が向上して大水深海域への適用が容易になる。また同時に、底面積も大きくなるので地盤反力が小さくなり、マウンドの支持力の観点から有利となり、軟弱地盤への適用が容易となる。その結果として、マウンド施工費と地盤改良費の削減につながる

可能性がある。

3. ハイブリッド曲面版の強度特性

3.1 概要

コンクリート構造物としてのハイブリッドケーソンの部材設計においては、安全性、使用性、あるいは復旧性などに関する照査が必要である。一般の防波堤ケーソンでは、安全性がその主たる照査項目となる。通常は、安全性を終局限界状態に置き換え、終局限界状態の検討を行うことになる。そこで、終局限界荷重として、波力に代表される分布荷重を想定し、ハイブリッド曲面版の終局強度をFEM解析により検討した。また、波力以外の終局限界を考慮すべき荷重作用として流木あるいは船舶などによる衝突などが考えられる。ここでは、これらを集中荷重と考え、載荷試験とFEM解析により終局強度を検討した。

3.2 分布荷重に対する強度特性

(1) 解析モデル

等分布荷重に対するハイブリッド曲面版の終局強度を

FEM解析により検討する。解析対象のモデルを図-3に、モデル諸元を表-1に示す。モデルの形状は、相互の比較検討を目的として、平面版と曲面版2種類の合計3種類とした。

図-1に示したように、曲面外壁は、曲率を付与した辺を隔壁で支持し、曲率を付与していない辺を底版もしくは水平補強材で支持されることになる。したがって、支持部材の適切な配置を検討するため、平面版の短辺側に曲率を付与した楕型曲面版モデルと長辺側に曲率を付与した弓型曲面版モデルからなる2種類の曲面版モデルを設定した。

また、図-3に示す解析モデルは、ハイブリッド版および鉄筋コンクリート (RC) 版の2種類とした。ハイブリッド版は、スタッドを介して鋼板とコンクリートを結合したモデルとし、4辺を固定支持とした。コンクリートは、均質等方性材料と仮定して、版厚方向に4分割し、ソリッド要素でモデル化した。鋼板はシェル要素に、スタッドははり要素にモデル化した。スタッドとコンクリートは、コンクリート版厚方向の3要素の節点で結合した。

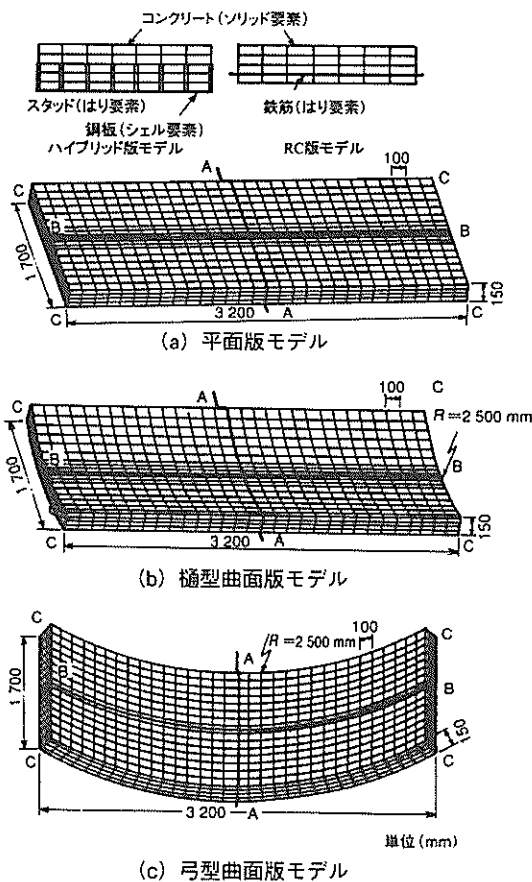


図-3 解析モデル

RC版は、ハイブリッド版と同様にモデル化した。鋼板のかわりに引張鉄筋を導入し、その量は、ハイブリッド版の引張鋼材量とほぼ同じとした。鉄筋はスタッドと同様にはり要素でモデル化し、コンクリートをモデル化したソリッド要素と完全に結合した。鋼材とコンクリートの応力-ひずみ関係は、図-4に示すように、材料非線形性を考慮した。

表-1 解析モデルの諸元

形状	平面および曲面合成版
コンクリート厚	150mm
曲率半径	2500mm
鋼板厚	3.2mm
鉄筋径	17.5mm
スタッド径	9.5mm
境界条件	4辺固定
荷重条件	等分布荷重

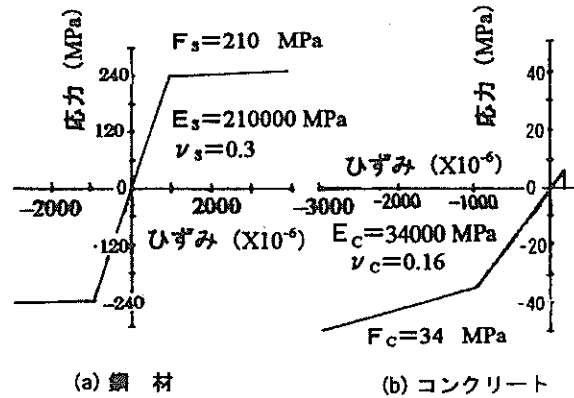


図-4 材料の応力-ひずみ関係

表-2 解析ケース

No	名称	形状	構造	荷重条件
1	HBPC	平版型	ハイブリッド版 (HB)	正曲げ
2	HBGC	楕型		
3	HBAC	弓型		
4	RCPC	平版型	鉄筋コンクリート版 (RC)	
5	RCGC	楕型		
6	RCAC	弓型		
7	HBPS	平版型	ハイブリッド版 (HB)	負曲げ
8	HBGS	楕型		
9	HBAS	弓型		

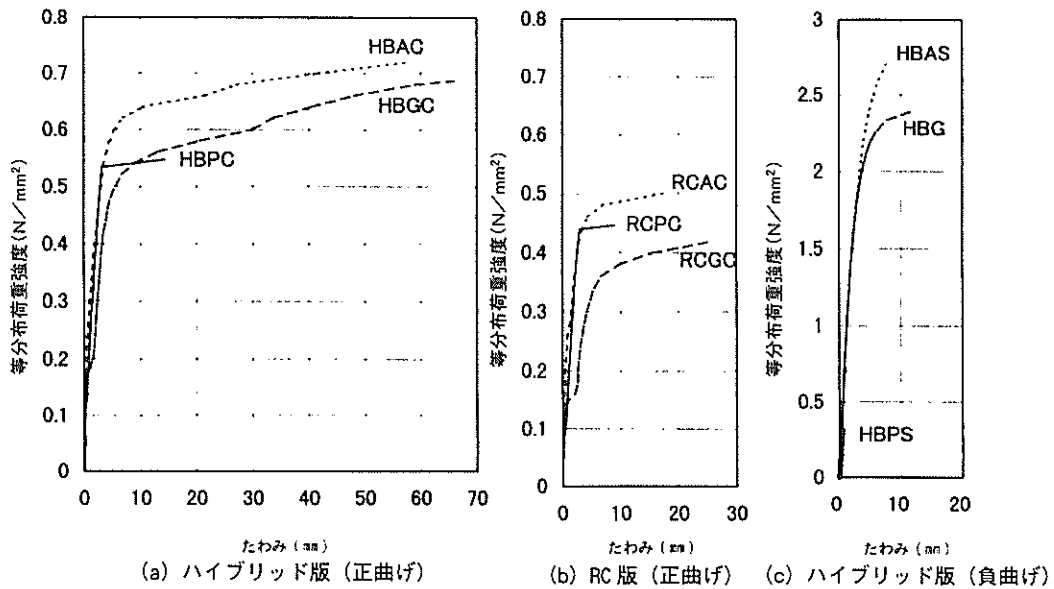


図-5 等分布荷重強度とたわみの関係

表-3 解析結果一覧

モデル	終局強度 P_u (N/mm^2)	終局強度比 P_u/P_{HBPC}	初期ひび割れ 強度 P_c (N/mm^2)	ひび割れ 強度比 P_c/P_{HBPC}	初期剛性 ($\times 10^4 kN/m$)	破壊エネルギー E_f ($\times 10^4 kNmm$)
HBPC	0.55	1.00	0.11	1.00	288	3.75
HBGC	0.69	1.25	0.16	1.45	486	21.15
HBAC	0.72	1.31	0.16	1.45	553	20.32
RCPC	0.45	0.82	0.08	0.73	205	1.81
RCGC	0.42	0.76	0.14	1.45	427	4.62
RCAC	0.50	0.91	0.14	1.45	482	4.49
HBPS	0.32	0.58	—	—	362	0.21
HBGS	2.40	7.50	—	—	494	11.42
HBAS	2.72	8.50	—	—	562	8.02

注) HBGSとHBASの終局強度比については、 P_{HBPS} との比 P_u/P_{HBPS} を示した。

解析ケースを表-2に示す。表中のモデル名称において、先頭2文字のHBはハイブリッド版を、RCはRC版を示す。3文字目のP、G、Aはそれぞれ平面版、極型曲面版、弓型曲面版を示す。末尾のCとSは、それぞれ正曲げ（鋼板に引張力が作用する）および負曲げ（鋼板に圧縮力が作用する）を示す。これらの載荷条件は、ケーソンに作用する押波荷重と引波荷重をそれぞれ模擬したものである。

解析では、材料非線形性と幾何学的非線形性を考慮した。また、コンクリートのひび割れ発生、圧縮破壊および鋼板とのはく離を考慮した。

(2) 分布荷重強度とたわみの関係および強度特性

図-5に分布荷重強度とたわみの関係、表-3に終局強度、剛性およびじん性の解析結果を示す。

表-3に示すように、ハイブリッド曲面版の終局強度は、

ハイブリッド平面版より大きくなった。これは、分布荷重に対して、平面版では曲げ応力が支配的になるのに対して、曲面版では曲げ応力と膜応力の2種類が支配的になったことによる。

正曲げでは、HBGCの終局強度はHBPCの1.25倍、HBACの終局強度は1.31倍であった。これは、この方向の荷重載荷に対して膜応力は引張となり、鋼板が主たる抵抗材になったためである。

負曲げでは、HBGSの終局強度はHBPSの7.50倍、HBASの終局強度は8.50倍であり、正曲げの場合と比較して終局強度が大きくなった。その理由は、負曲げに対して膜応力は圧縮となり、鋼板とコンクリートの両方が抵抗材になったためである。

破壊エネルギー E_f は、式(1)で表される破壊に至るまでの分布荷重強度-変位曲線の面積で評価される。表-3に示すように、ハイブリッド構造における楕型曲面版と弓型曲面版の平均破壊エネルギーは、ハイブリッド平面版と比較して、正曲げでは5.5倍、負曲げでは46.5倍となった。

$$E_f = A \int_0^{\delta_u} P \delta d\delta \quad (1)$$

ここに、

δ_u : 終局強度時のたわみ

A: 載荷面積

P: 分布荷重強度

このように、終局強度特性と破壊エネルギーに関して、ハイブリッド版はRC版より優れた特性を示し、その中でもハイブリッド曲面版は、特に優れた特性を示した。

楕型曲面版と弓型曲面版を比較すると、表-3に示したように、終局強度においては弓型曲面版がやや優れており、破壊エネルギーにおいては楕型曲面版がやや優れていた。

(3) 破壊メカニズムと強度

曲面版と平面版の破壊過程を検討する。コンクリートの引張破壊、すなわちひび割れ発生は、最大主応力がコンクリートの引張強度に達した時点で生じるものとした。また、圧縮応力下におけるコンクリートの破壊条件は、Drucker-Pragerの破壊則を用いた。これは、主応力の和 J_1 および偏差応力の2次不変量 J_2 の関数として、式(2)で定義される。

$$f = a J_1 + \sqrt{J_2} = k \quad (2)$$

ここに、

$$J_1 = \sigma_{ij}$$

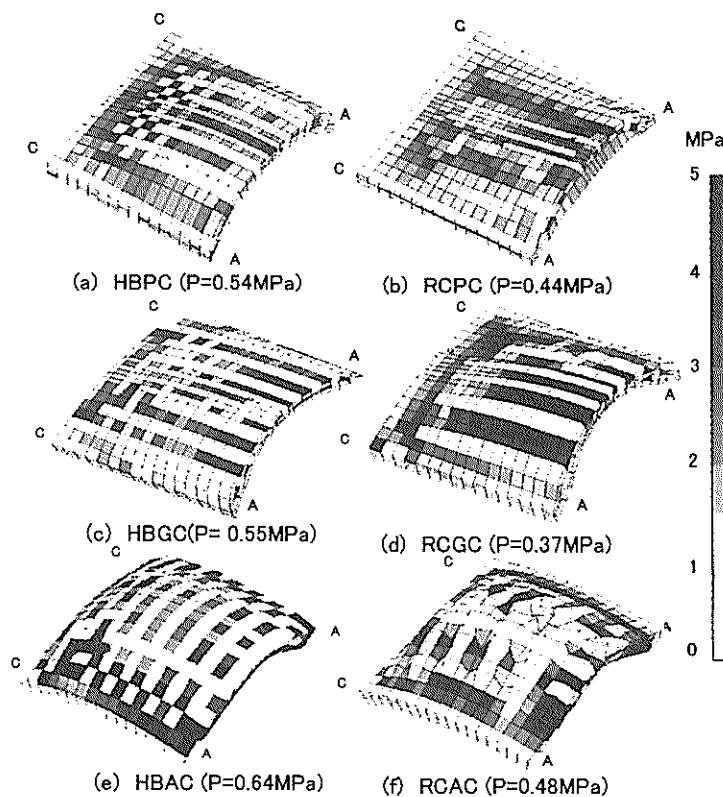


図-6 最大主応力分布

$$J_2 = S_{ij}S_{ij} / 2$$

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - (J_1/3)\delta_{ij}$$

α : 材料定数 (=0.07)

k : せん断降伏応力

δ_{ij} : $i=j$ のとき1, $i \neq j$ のとき0

鋼板およびスタッドの塑性化は、von Misesの降伏条件で判定した。これは、式(2)で $\alpha=0$ とした場合に相当する。

正曲げの場合の解析結果を図-6と図-7に示す。図-6はコンクリート下面の最大主応力分布を示し、図-7は図-6のA-A断面における荷重載荷ステップごとの破壊モード

を示している。なお、着目点は、図-6のA~Cと図-7の①~⑦に示すとおりである。また、図中に示すPは分布荷重強度を示す。

破壊モードは、次の1)から3)に示すように、版の形状ごとで異なった特性を示した。

1) 平面版

まず、図-7(a), (b)の①に示す固定端でひび割れが発生し、同時に同図②の版中央部において曲げ変形を起こした。その後、同図③に示す固定端近傍で曲げ破壊を起こし、版全体が押し抜かれて破壊した。

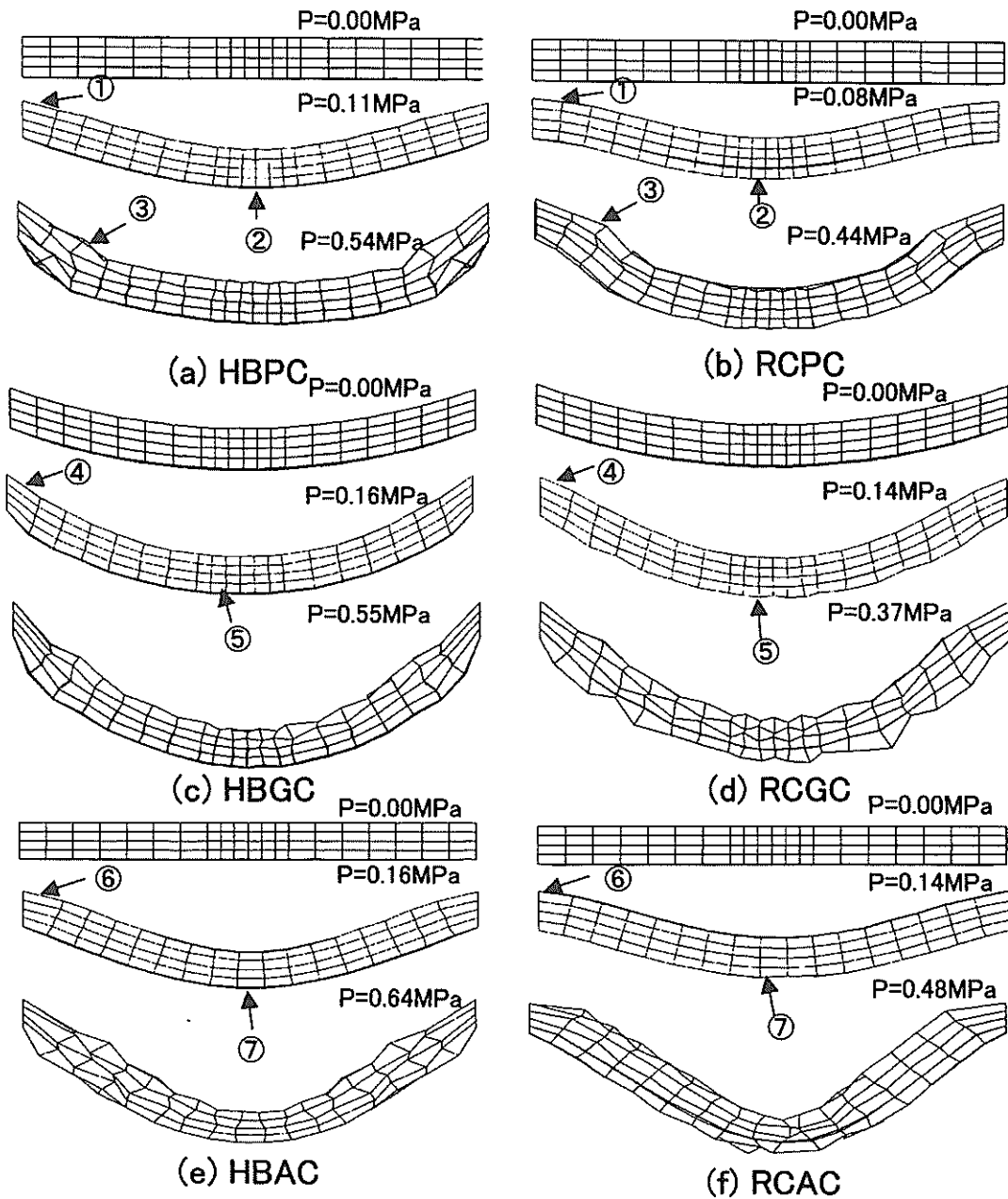


図-7 破壊モード

2) 極型曲面版

最初に、図-7(c), (d)の④に示す固定端でひび割れが発生した。その後、引張膜力によるひび割れが同図⑤のコンクリートの下面に分散して、全体的にたわんだ。最終的に固定端近傍における引張膜力により、ハイブリッド版では鋼板が降伏し、またRC版では引張鉄筋が降伏したため、たわみが急増して破壊した。

3) 弓型曲面版

まず、図-7(e), (f)の⑥に示す固定端でひび割れが発生した。その後、極型曲面版と同様に、引張膜力によるひび割れが同図⑦のコンクリートの下面に分散し、膜力により全体的にたわんだ。最終的に同図⑦の版中央部において、曲げ破壊を起こした。

構造別に考察すると、RC版は、コンクリートにひび割れが発生した後、引張鉄筋での局所的ひずみの集中により、ハイブリッド版よりも早く終局状態に達した。一方、ハイブリッド版は、コンクリートにひび割れが発生しても直ちに終局状態には至らなかった。

特に、ハイブリッド平面版では、曲げ応力が支配的であるため、コンクリートから鋼板への荷重再分配効果が明確に現れず、図-5に示したように、剛性の変化が小さかった。一方、ハイブリッド曲面版では膜応力が支配的であるため、コンクリートから鋼板への荷重再分配効果を明確に確認することができ、破壊に至るまでの剛性の変化が大きく現れた。したがって、ハイブリッド平面版やRC版と比較して、ハイブリッド曲面版は粘り強い破壊過程を示し、優れたじん性を示したものと言える。

3.3 集中荷重に対する強度特性

(1) 載荷試験の方法および結果

試験体は、図-8に示すように、ハイブリッド平面版試験体P1、ハイブリッド曲面版試験体C1およびC2の合計3体とした。曲面版の曲率半径は2500mmとした。また、ケーソン内部の隔壁と補強材の配置を考慮して、P1およびC1は2辺単純支持とし、C2は4辺単純支持とした。図-9に載荷試験の状況を示す。

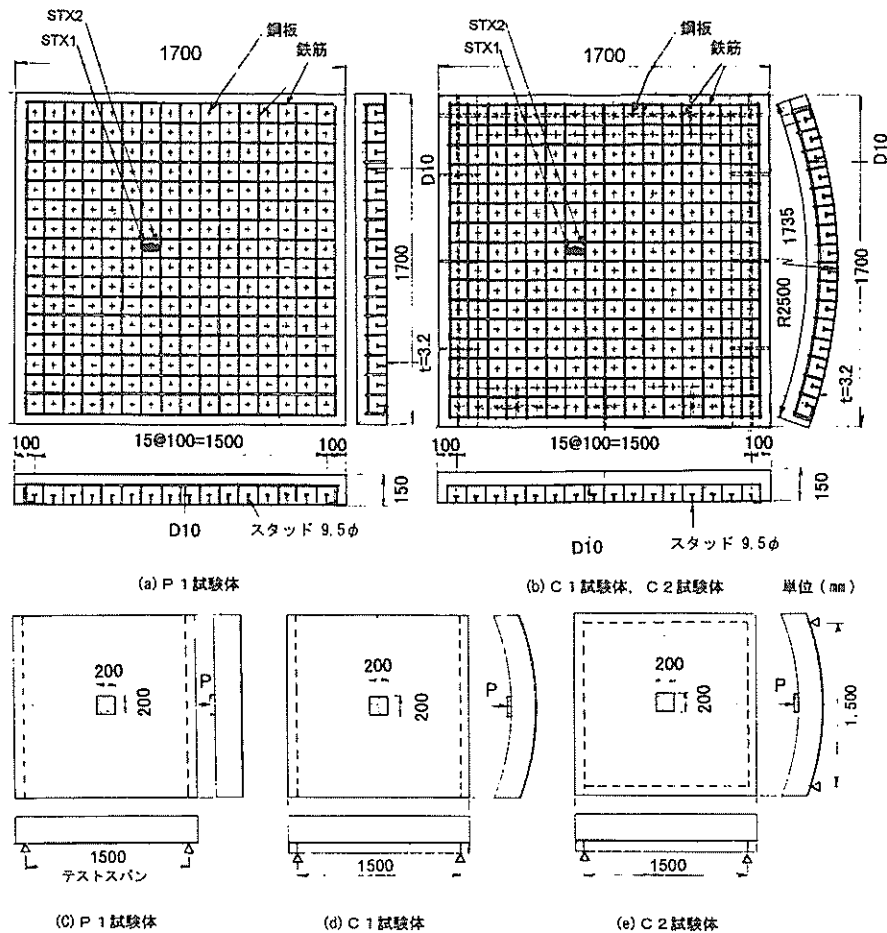


図-8 集中荷重試験モデル

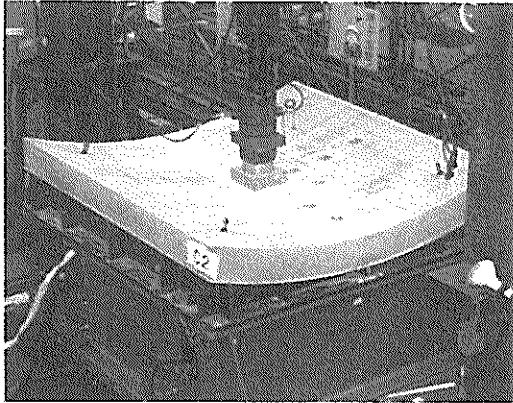


図-9 荷重試験状況

図-10に荷重とたわみの計測結果を示し、表-4に終局荷重と初期のたわみ剛性を示す。

2辺支持平面版の曲率を増加させると、断面2次モーメントとたわみ剛性が増加する。その解析結果を図-11に示す。P1に対するC1の剛性比は約2倍であるのに対して、表-4に示す実測値は1.48倍となり、これよりやや小さくなった。これは、荷重が中央集中荷重であるため、パネル中央が局部的に変形したことによると考えられる。

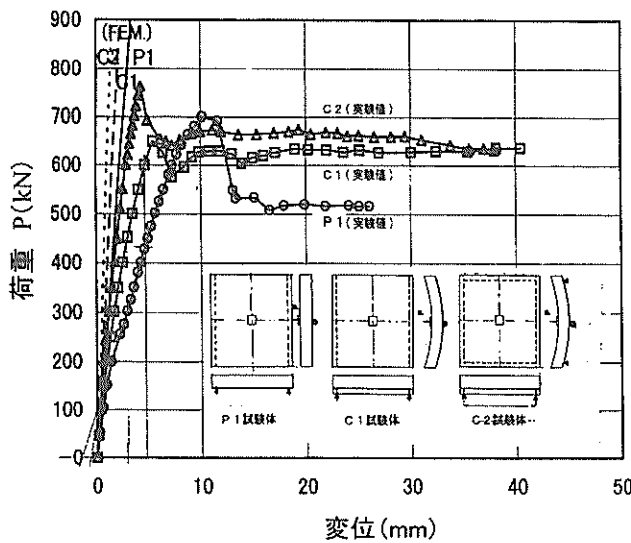


図-10 荷重-たわみ計測結果

スタッドの軸方向発生応力 (STX1およびSTX2) の変化を図-12に示す。測定位置は、図-8中に黒丸で示した箇所である。平面版試験体P1の場合、集中荷重が作用すると、約180kNでたわみ剛性が若干低下するとともに、スタッドの曲げ変形が逆方向に変化した。これは、鋼板とコンクリートとの付着力が消失し、両者の間にずれが発生したためと考えられる。荷重-たわみ関係は、図-10のとおり、500kNまではほぼ線形関係を保ち、その後、少しずつ変形が増加し、700kNで押し抜きせん断破壊の形態を示した。破壊後の最大残留耐力力は、終局荷重の74% (520kN)を示した。さらに荷重を継続すると、押し抜かれた部分が沈下し、下鋼板が顕著に面外変形した。最終的に鋼板とコンクリートとははく離によって、ほぼ楕円形の800×1400mmの範囲内のスタッドが鋼板からはく離した。

曲面版試験体C1とC2の場合、約160kNでスタッドのひずみに変化が現れるとともに、鋼板のひずみ変化も大きくなった。終局荷重に近い600kNではコンクリート上面に約1300mm×1000mmの楕円状のひび割れが発生し、押し抜きせん断破壊を示した。C1の破壊後の最大残留耐力力は終局荷重の97% (630kN)を示し、C2は終局荷重の88%

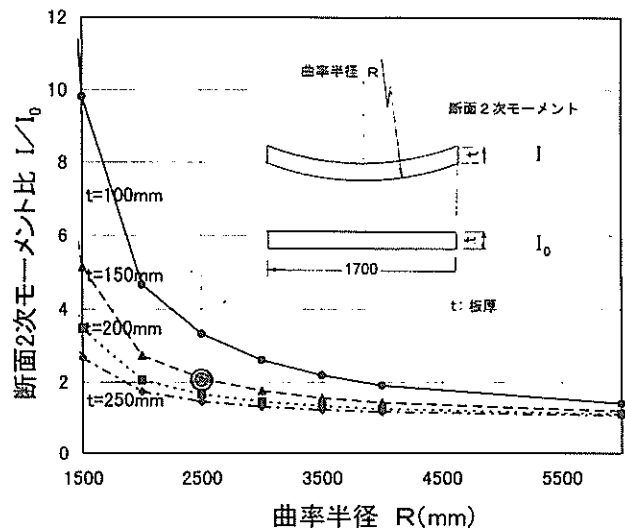


図-11 曲率半径と断面2次モーメントの関係

表-4 荷重試験結果一覧

試験体	最大荷重 P_u (kN)	最大残存 耐力 P_r (kN)	初期剛性 $K=P/d^{*2}$ ($\times 10^4$ kN/m)	荷重比 P_r/P_u	FEMによる 剛性: K_{fem} ($\times 10^4$ kN/m)
P1	700	520	17.3	0.74	25.6
C1	650	630	25.6	0.97	33.4
C2	763	670	40.5	0.88	51.8

(*1) 押し抜きせん断破壊後を示す。

(*2) 変位

(670kN)を示した。さらに荷重を継続すると、中心から直径約500~600mmのほぼ円形範囲内のスタッドが鋼板からはく離れた。

RC版の押し抜きせん断破壊は、一般に脆性的であるため、せん断補強などの設計上の配慮が必要となる。ハイブリッド版では、鋼板が版の全面に配置されているため、押し抜きせん断破壊が生じにくく、その結果、優れたエネルギー吸収能力を示した。特に、曲面版は平面版と比較して耐力の低下が小さかった。

(2) FEM解析

試験体P1, C1, C2に対して、FEM線形解析を行った。一例として、C1およびC2の解析モデルを図-13に示す。3.2と同様に、コンクリートはソリッド要素、鋼板はシェル要素、スタッドははり要素でモデル化した。コンクリートと鋼板の境界に生じるせん断力がスタッドを介して伝達されることを考慮して、コンクリート要素と鋼板要素は各々の節点を直接結合せず、0.5mmの隙間を設けた。

表-4にFEM解析で得られた剛性 K_{fem} を示した。ただし、得られた値は線形解析によるものであるため、鋼板とコンクリートとのずれ、応力-ひずみ関係の非線形性、および試験体コンクリート部分に生じる微細なひび割れは考慮していない。

図-14に100kNの集中荷重載荷時におけるスタッド部分の水平せん断応力分布とコンクリートの最大および最小主応力の分布を示す。スタッド部分の水平せん断応力は、載荷点近傍で最も大きくなった。黄色で示す載荷点近傍での同一せん断応力の分布範囲は、P1, C1, C2の順に小さくなった。

コンクリートの最大主応力分布の解析結果から、いずれのモデルでも、荷重載荷点近傍の下面において、ひび割れ発生応力に近い応力が計算されることが確認された。特に、C1とC2では、荷重が600kN程度の際に、モデル支

持点近傍の上面においてひび割れ発生応力に近い引張応力の発生領域が確認された。

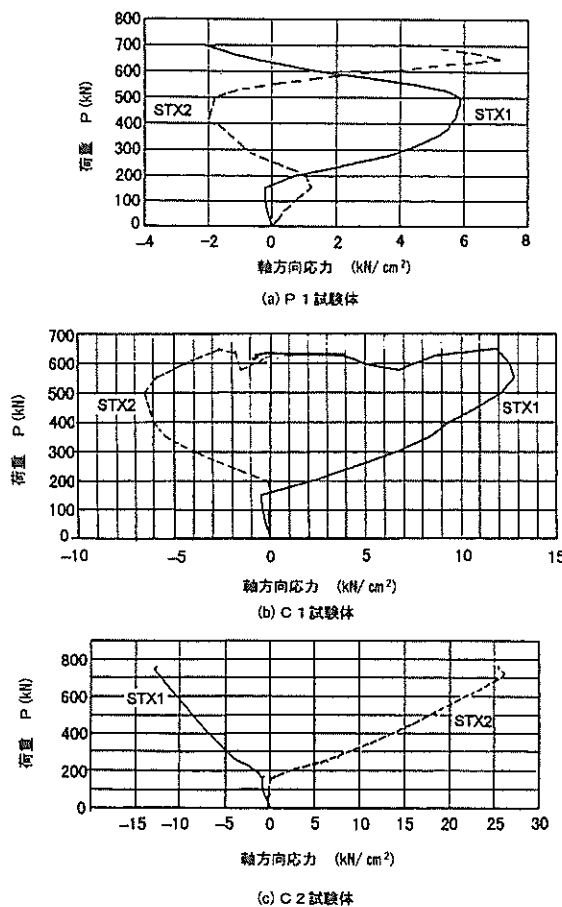


図-12 スタッドの荷重-応力関係

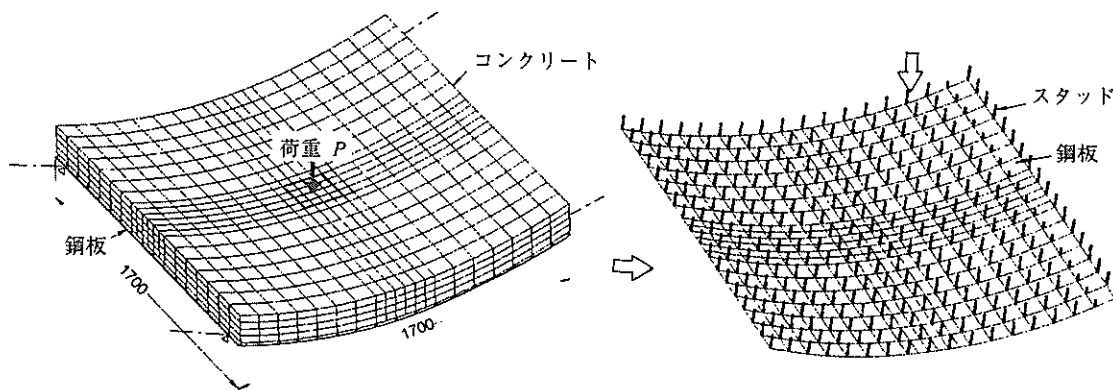
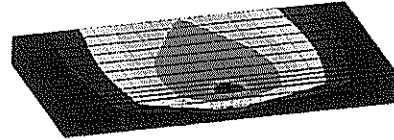
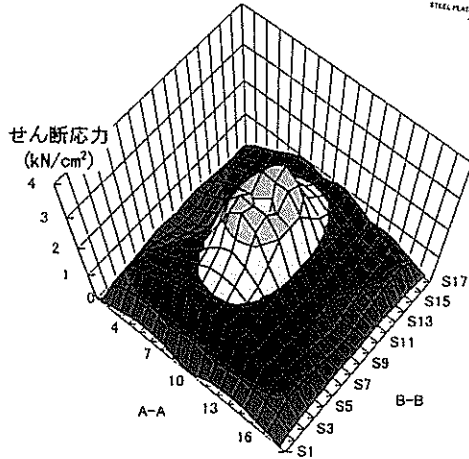
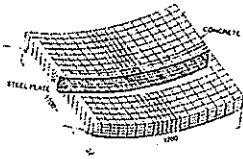
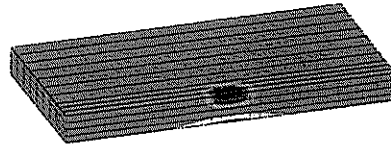


図-13 FEM要素分割図

スタッドのせん断応力

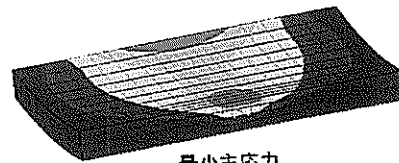
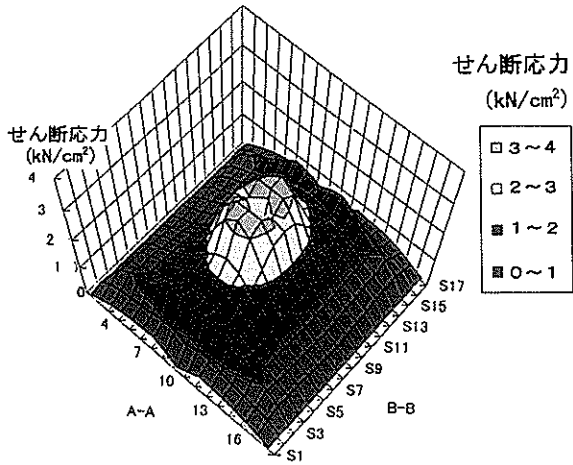


最小主応力

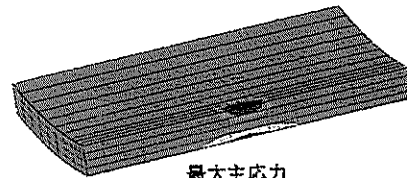


最大主応力

(a) P1 試験体

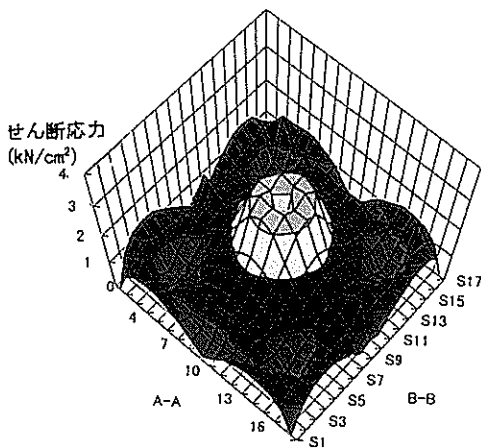


最小主応力

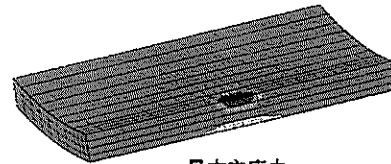


最大主応力

(b) C1 試験体



最小主応力



最大主応力

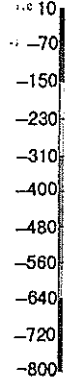
(c) C2 試験体

スタッドのせん断応力分布

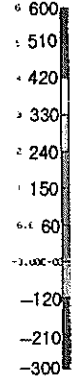
コンクリートの主応力分布

図-14 スタッドのせん断応力分布およびコンクリートの主応力分布

最小主応力
(N/cm²)



最大主応力
(N/cm²)



4. 曲面版ハイブリッドケーソン全体系の強度特性

曲面版ハイブリッドケーソン全体系の構造は、曳航時に必要な剛性や完成時の安定性を考慮して決定する必要

がある。曲面版ハイブリッドケーソンの全体構造の強度特性は、曲面版の曲率半径に大きく左右されると考えられる。そこで、曲面版の強度に及ぼす曲率半径の影響と曲面版の設計方法について、FEM解析により検討した。

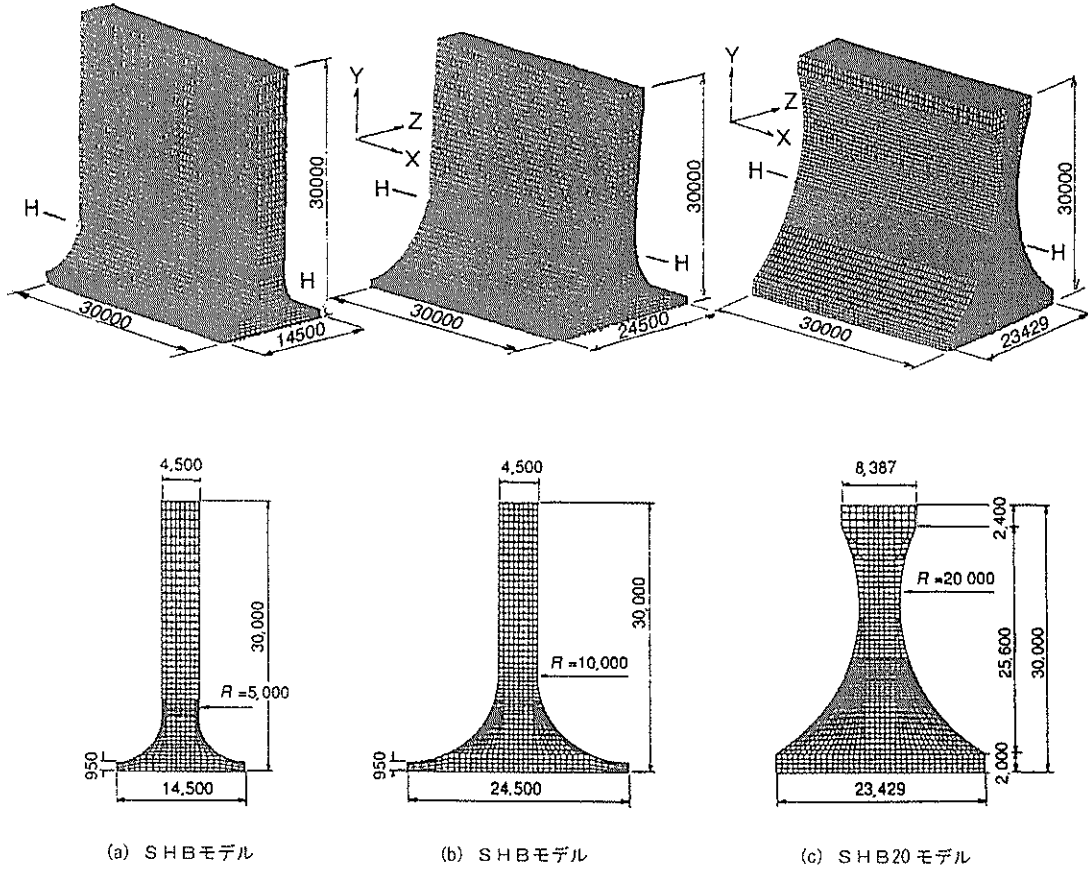
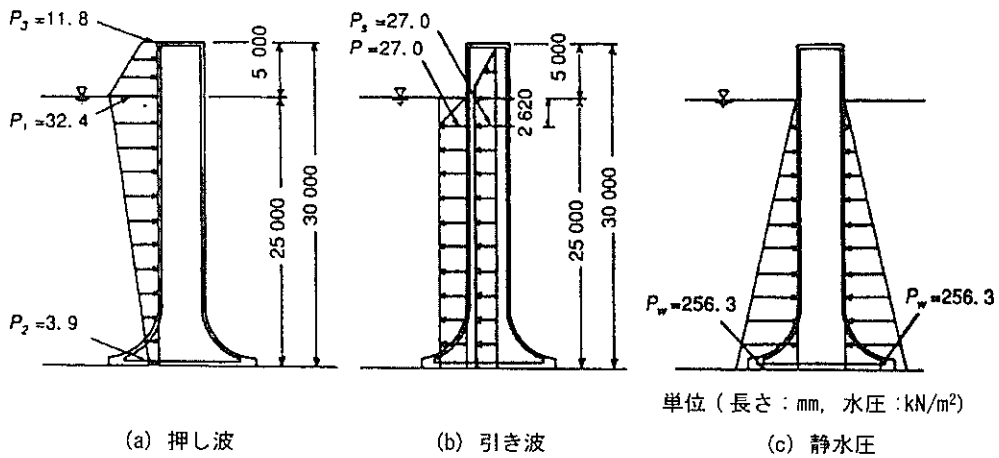


図-15 FEM全体解析モデル



単位 (長さ: mm, 水圧: kN/m²)

図-16 載荷荷重

4.1 曲面版の強度に及ぼす曲率半径の影響

(1) FEM解析

曲面版ハイブリッドケーソン全体系の強度特性を図-15に示すFEMモデルにより検討した。曲面壁の曲率半径

として5m, 10m, 20mの3種類を設定した。モデル名称は、曲率半径の順にSHB5, SHB10およびSHB20とした。載荷荷重は、図-16に示す静水圧に対して、押波荷重または引波荷重を組み合わせた2種類とした。

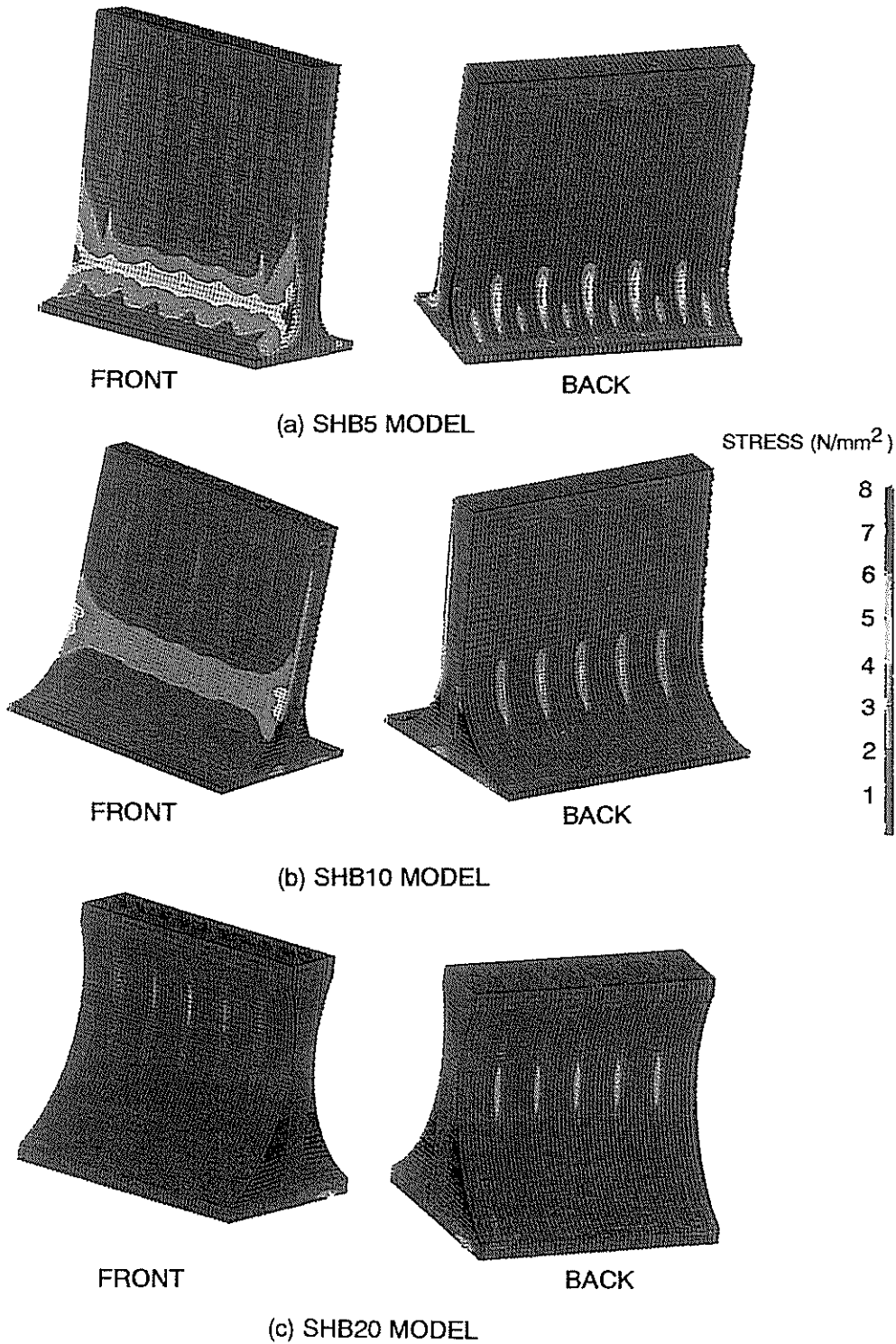


図-17 最大主応力分布

解析結果を表-5に示す。曲率半径が大きくなるにしたがって、ケーソンの変形量と曲面外壁における発生応力が減少した。押波荷重を作用させた場合、同表に示した

ように、モデル頂部（天端）の水平変位量は、SHB5では116mmを示したのに対して、SHB20では25mmとなり、約1/4.6に減少した。

表-5 発生応力，変位，地盤反力

荷重形式	項目	位置		SHB5		SHB10		SHB20	
				前面	後面	前面	後面	前面	後面
押波	応力 (N/mm ²)	曲面外壁	隔壁上	5.32	6.85	3.44	4.83	2.23	2.58
			端部	7.76	2.54	5.21	0.91	1.82	0.83
		隔壁	凹部		186		77		29
	変位(mm)	頂部		116		41		25	
地盤反力 (kN/m ²)	フーチング先端		526		216		224		
引波	応力 (N/mm ²)	曲面外壁	隔壁上	9.52	4.42	4.46	2.00	2.02	2.00
			端部	1.50	7.12	1.18	3.96	1.24	0.88
		隔壁	凹部	280		112		96	
	変位(mm)	頂部		76		21		13	
地盤反力 (kN/m ²)	フーチング先端		454		164		179		

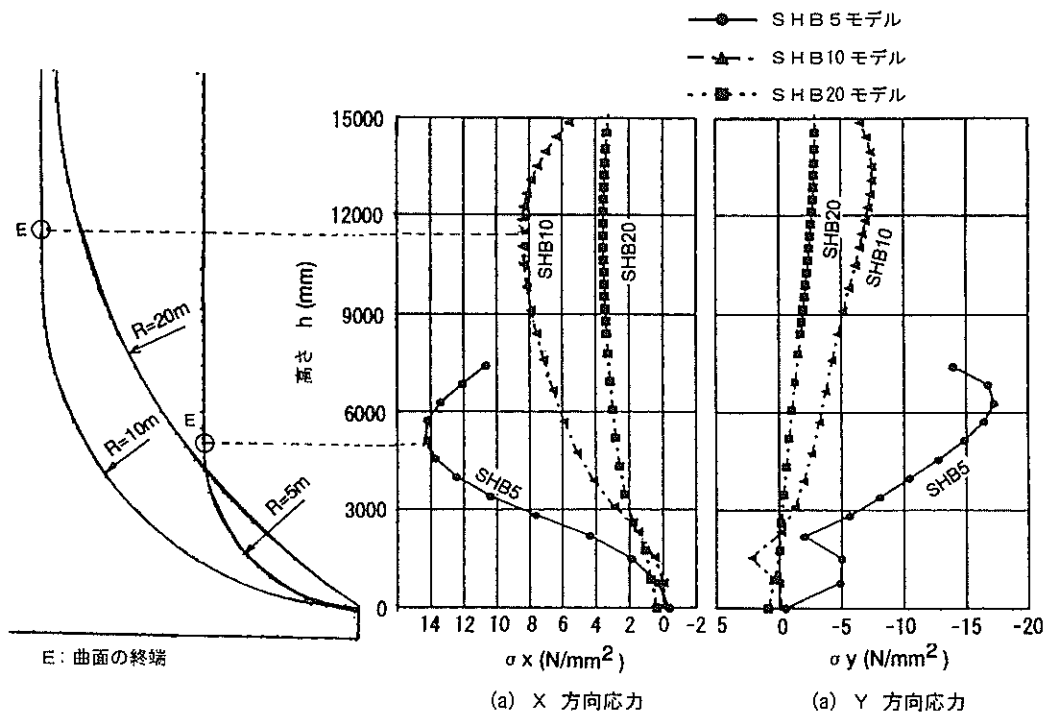


図-18 母線方向応力分布

図-17に曲面壁に生じる最大主応力分布を示す。押波荷重を作用させた曲面壁の隔壁上では、SHB5の最大主応力は 5.32N/mm^2 であったのに対して、SHB20では 2.23N/mm^2 となり、約1/2.4に減少した。

図-18に曲面に沿った応力分布 σ_x および σ_y を示す。すべてのモデルにおける最大応力は、曲面の終点Eで発生した。SHB20のx方向最大応力は、SHB5の約1/3.8であった。解析結果から、曲面壁の応力集中を緩和するためには、曲率半径を大きくとることが効果的であることが確認された。

(2) 有効幅の検討

フーチング部は、底版と曲面壁を上下フランジとする箱型複合構造である。そのため、曲面壁断面には、せん断遅れ現象²⁾が発生することが予想される。そこで、曲面壁断面の合理的な設計法を提案するために、有効幅の検討を行った。

図-19にE点における曲面壁断面での垂直応力分布を示す。全体的に曲率半径が大きくなるにしたがって、発生応力とその変動幅は小さくなった。断面の垂直応力分布に基づいて、隔壁を中心とした曲面壁の片側有効幅 b_e を式(3)³⁾で算定した。

$$b_e = \frac{\int_0^L \sigma_x dx}{\sigma_{max}} \quad (3)$$

ここに、

σ_x : 曲面壁の断面における垂直応力

σ_{max} : 曲面壁断面の隔壁位置における最大垂直応力

L: 隔壁間隔の1/2

その結果、SHB20で2.455m、SHB10で2.236mおよびSHB5で1.967mと計算された。すなわち、曲率半径が大きくなるにしたがって有効幅は大きくなり、曲率半径が20mの場合、有効幅は隔壁間隔5mの曲面壁のほぼ全域に近くなった。これらの計算結果に基づいて、有効幅の簡易推定式を式(4)に示すように定式化した。

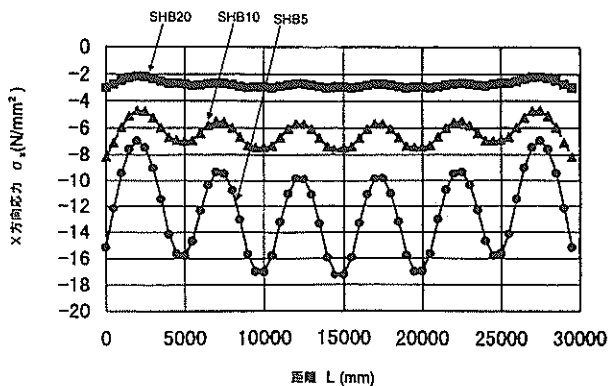


図-19 曲面壁断面での垂直応力分布

$$b_e = 170(rT)^{0.17} \quad (4)$$

ここに、

r: 曲率半径 (mm)

T: 曲面版の版厚 (mm)

4.2 フーチングの剛体判定

ケーソンのフーチングが力学的に剛体とみなせる場合には、底面の地盤反力は直線分布すると考えてよい⁴⁾。曲面版ハイブリッドケーソンのフーチングは、図-20に示すように張り出し長が長く、曲面壁-隔壁-底版で構成される箱型複合構造であるため、力学的に剛体とみなせるかどうかは明らかにされていない。したがって、フーチングに対して既往の剛体判定式⁵⁾とFEM解析を用いて評価した。

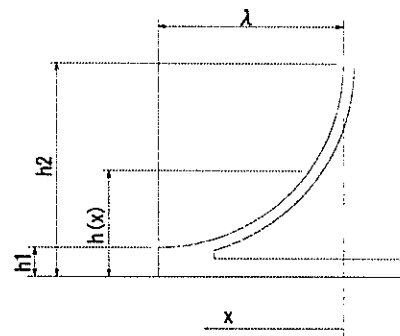


図-20 フーチング剛体判定パラメーター

(1) 剛体判定式

フーチングは、基礎地盤と接しているため、ケーソンが波力などの外力を受けた場合は、基礎捨石からフーチングに対して地盤反力が伝達される。したがって、フーチングの力学的な剛体性は、フーチングの形状のみから単独に評価すべきではなく、基礎地盤の地盤反力係数との相対関係から評価される⁹⁾。そこで、フーチング部の剛体判定式として、フーチングの剛性と地盤反力係数の両方を加味した式(5)⁵⁾を用いた。

$$\beta\lambda \leq 1.0 \quad (5)$$

ここに、

$$\beta: \text{フーチングの特性値} = \sqrt{\frac{3K_v}{Eh^3}}$$

K_v : 基礎の鉛直方向地盤反力係数 (kN/m^3)

E: フーチングの弾性係数 ($3 \times 10^7 \text{kN/m}^2$)

$$h: \text{フーチングの平均厚さ (m)} = \int_0^\lambda \frac{h(x)}{\lambda} dx$$

λ: フーチング端部から先端までの距離(m)
 x: フーチング端部から先端方向への距離(m)
 基礎地盤として捨石マウンドを想定して, 異なる鉛直
 方向地盤反力係数を有する3種類の捨石マウンドに対す

るフーチングの剛体の程度を検討した. 検討結果を図-21
 に示す. フーチング長が10m以上で, かつ鉛直方向地盤反
 力係数が10 000kN/m³の場合には, 剛体であると判定でき
 なかった. 一方, フーチング長が10m以下であれば, 鉛直

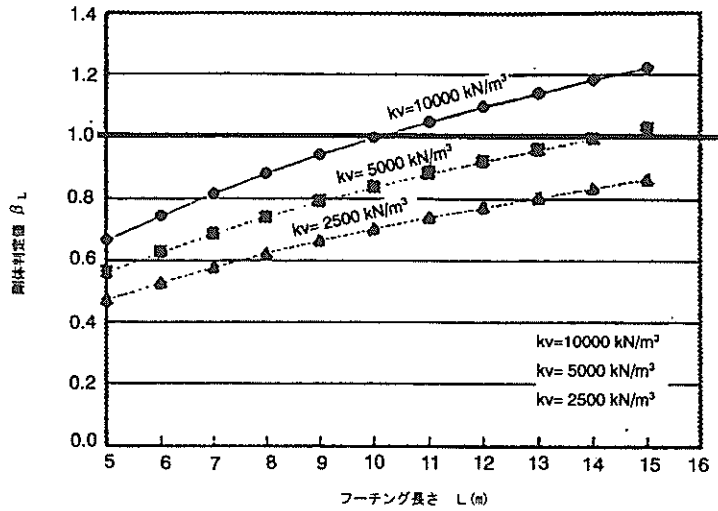


図-21 剛体判定値

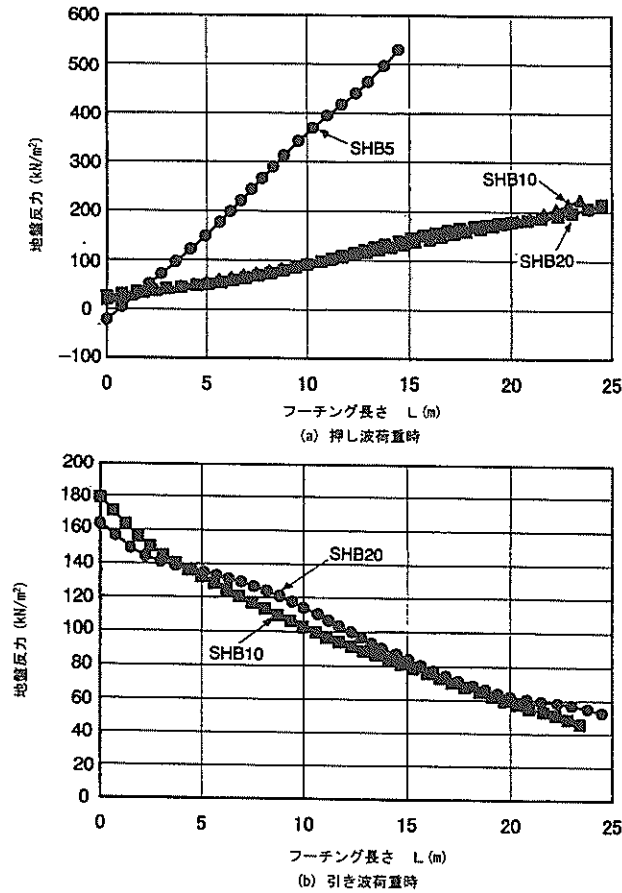


図-22 地盤反力分布

方向地盤反力係数の値には関係なく、フーチングを剛体と判定することができた。

(2) FEM解析結果

4.1で検討した3種類のFEM解析モデルSHB5, SHB10, SHB20で得られた地盤反力分布を図-22に示す。すべてのケースにおいて、地盤反力はほぼ直線分布となった。

これらの結果から、フーチング長が10m以下であれば、フーチングを剛体とみなしてもよいと判断できる。

5. 実物大部分模型施工試験

曲面版ハイブリッドケーソンの施工性を検討するために、高さ10m、奥行き13.3m、長さ6mの模型を製作した。この模型はフーチングと外壁の一部を実物大で製作したものである。図-23にその概要を示す。施工性を比較するために、模型断面の左半分は曲面版ハイブリッドケーソンとし、右半分は従来型ハイブリッドケーソンとした。

検討では、曲面壁の施工性、すなわち曲面鋼板の経済的な製作方法およびコンクリートの充填方法に重点を置いた。また、曲面壁の強度特性を把握することを目的として、完成した模型に対して加圧試験を行い、曲面壁に発生するひずみを計測した。

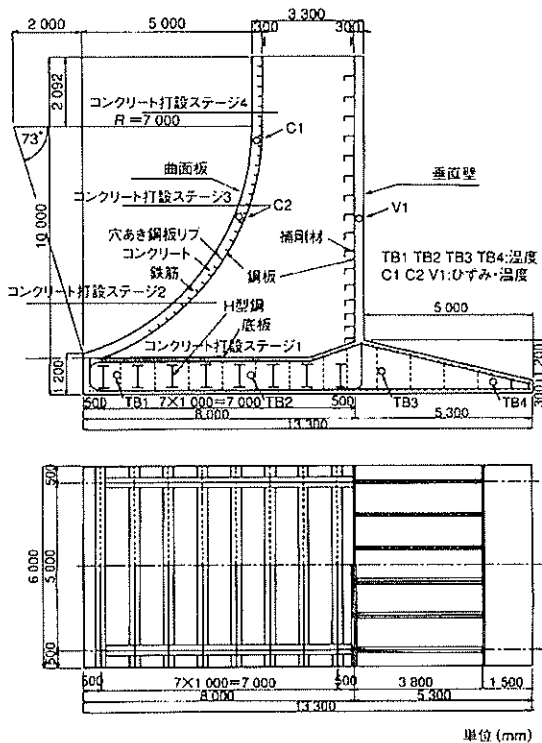


図-23 実物大部分模型概要

5.1 鋼板の曲面加工と補強

従来型ハイブリッドケーソンでは、鋼板とコンクリートのずれ止めとして頭付きスタッドを使用することが多い。その場合、コンクリート打設圧による鋼板の座屈を防止する補強材が別途必要となる。一方、曲面版ハイブリッドケーソンでは曲面鋼板を使用するため、一般的な製作方法では鋼板の曲面プレス処理が必要となる。またずれ止めに頭付きスタッドを使用した場合には、補強材が必要となる。つまり、従来の製作方法を曲面版ハイブリッドケーソンにそのまま適用した場合、鋼板の曲面プレス処理費が余分に発生するため、従来型ハイブリッドケーソンよりも製作コストが高くなることが予想される。したがって、頭付きスタッドの使用と鋼板の曲面プレス処理の両方を省略することに焦点を置いて、ここでは、孔あき鋼板リブ¹⁰⁾¹¹⁾のずれ止めとしての適用性と、プレス処理を必要としない鋼板の曲面加工方法を検討した。

曲面プレス処理を必要としない加工方法として、平面鋼板を曲面に加工した隔壁端部に沿わせることで曲面化する方法を検討した。実施工に先だって、FEM非線形解析によりこの方法の可能性を検討した。その結果、図-24に示すように、鋼板と法線直角方向隔壁・外壁とが完全に接触することがわかった。次いで、実施工において鋼板を曲面に加工した隔壁端部に沿わせることで、問題なく鋼板そのものを曲面化できることを確認した。図-25に施工の状況を、また、図-26に鋼殻の完成状況を示す。この方法を適用することにより、曲面プレス加工を省略し、製作工数を削減することができた。

孔あき鋼板リブは、図-27に示すように、帯状の平鋼に複数の開孔を設けた部材である。開孔部に充填されたコンクリートがせん断キーとなり、鋼板とコンクリートのずれ止めとして機能する¹⁰⁾¹¹⁾。また、必要な断面強度を確保すれば、コンクリート打設時の圧力に対する鋼板の座屈補強材となることも期待できる。

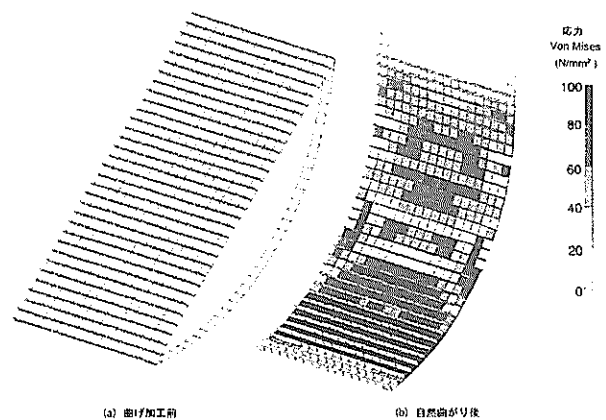


図-24 FEM解析による鋼板曲面加工の検証

鋼板に対する補強効果を確認するために、FEM解析によりコンクリート打設時における鋼板の応力と変形量を算定した。その際、鋼板は、4辺固定とし、荷重はコンクリート打設高3mに相当する圧力を载荷した。図-28に解析結果を示す。発生応力（Misesの相当応力）は鋼板の降伏点を大幅に下回っており、孔あき鋼板リブの鋼板全体に対する補強効果が確認できた。ただし、フーチングの先端では、降伏点を下回っていたものの、比較的大きな4.9mmの変形と68.1N/mm²の応力が発生した。これに対しては、実施工時において、鋼板下部と底版の間に支柱を配置するなどの対策が必要となる場合もあり得ると考えられる。

5.2 コンクリートの配合および打設性

施工試験で用いたコンクリートの配合を表-6に示す。設計基準強度は24N/mm²とし、使用セメントは高炉セメント、コンクリートのスランブは12cmとした。ただし、曲面壁に関しては、型枠内部への充填性を高めるために、流動化剤を後添加して、スランブを17cmに高めた。

図-29に曲面版の型枠内部へのコンクリート打設状況を示す。型枠は合板製とし、角型鋼管を曲げ加工して固定した。コンクリートの輸送・投入はポンプ圧送で行った。コンクリートの流動性は良好であり、孔あき鋼板リブの開孔部とその裏側に十分充填されていることを確認した。コンクリートの充填は棒パイプレータと型枠パイプレータにより入念に行った。

脱型後のコンクリート表面には若干の気泡跡が見られたが、型枠を鋼製にして、気泡をバキューム収集するなどの対策を併用すれば、さらに減らすことができると考えられる。

外壁コンクリートの打設は、図-23に示したように、4ステージに分割して行った。底版を最初に打設し、曲面外壁を4回に分けて打設した。打継目の施工は、ワイヤブラシと水洗いによって十分にレイタンスを除去し、入念に行った。図-30に模型の完成状態を示す。

5.3 コンクリートの温度・ひずみ計測

コンクリート打設後におけるコンクリートの硬化特性を把握するために、コンクリート内部の温度とひずみの経時変化を計測した。

図-31に温度の計測結果を示す。TB1～TB4は底版の計測箇所を示し、CIは曲面壁の計測箇所、VIは従来型ハイブリッドケーソン側の外壁（以下、直立壁と称す）の計測箇所を示す。外気温の平均値は約19℃であった。底版の温度は最大51.8℃まで上昇し、外壁の温度は最大26.5℃

まで上昇したが、温度ひび割れは発生しなかった。

図-32にCIとVIのひずみ経時変化を示す。同図(a)は、膨張ひずみと収縮ひずみの両者を含んだ値である。同図(b)は、これから収縮ひずみだけを抜き出してプロットした図である。また、比較検討のため、鉄筋コンクリート部分の収縮量の計算値⁶⁾も併せて示した。

表-6 コンクリート示方配合および実測強度

項目		底版	外壁
設計基準強度	(N/mm ²)	24	24
材齢28日圧縮強度	(N/mm ²)	25.4	29.1
スランブ	目標値	(cm)	15
	実測値	(cm)	14
	流動化後	(cm)	-
粗骨材最大寸法	(mm)	20	20
セメントの種類		低発熱型高炉セメント	
水セメント比	(%)	54	54
細骨材率	(%)	44.4	45.4
単位量 (kg/m ³)	セメント	332	321
	水	179	173
	細骨材	752	782
	粗骨材	946	938
	高流動化剤	0.830	0.803

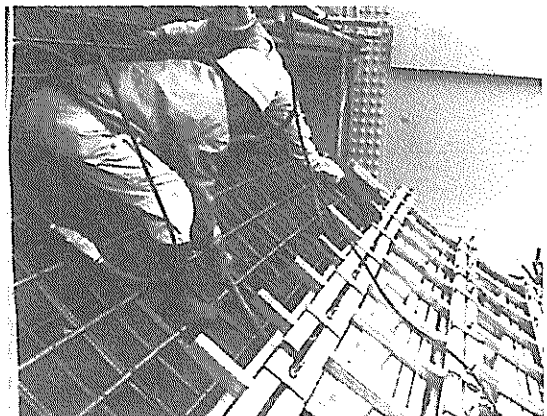


図-29 曲面版コンクリートの打設状況

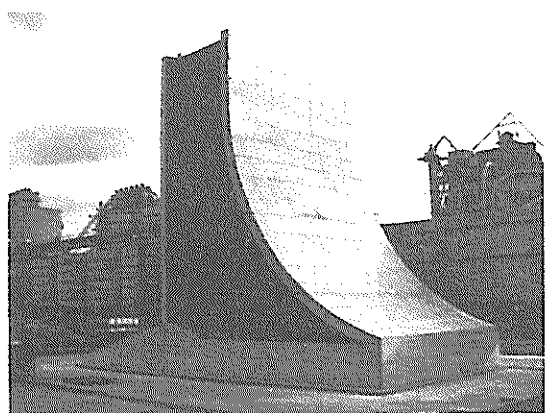


図-30 実物大部分模型の完成状況

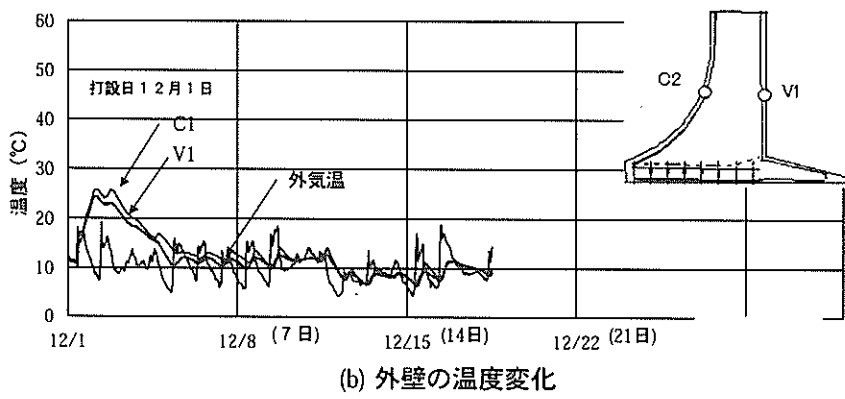
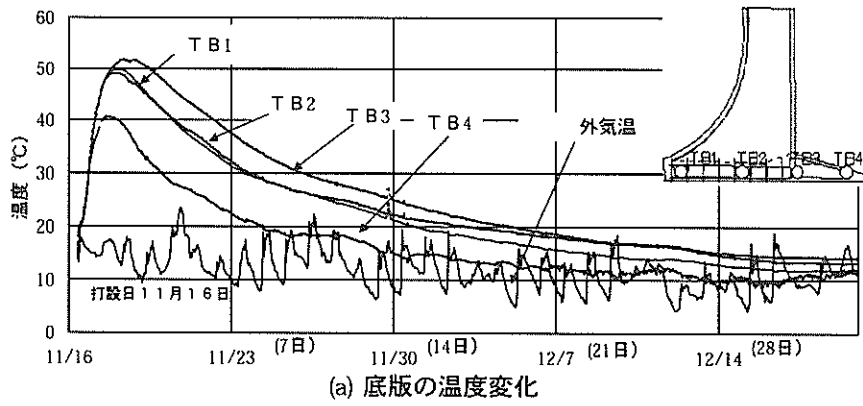


図-31 コンクリート温度の経時変化

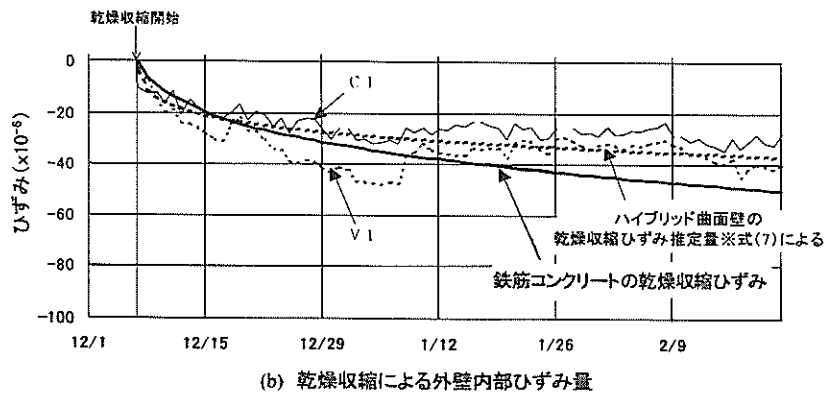
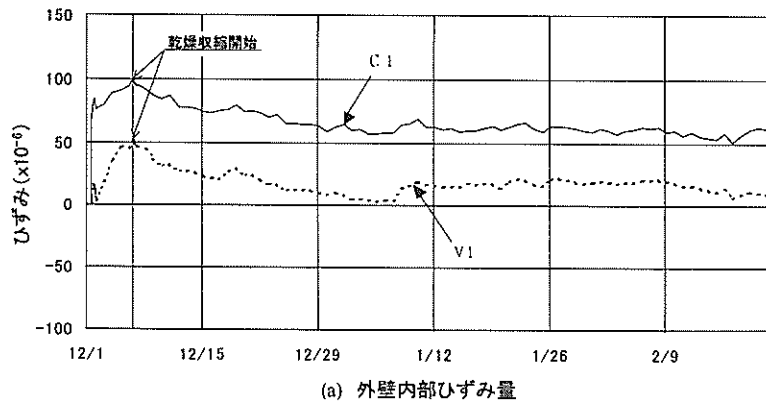


図-32 外壁ひずみの経時変化

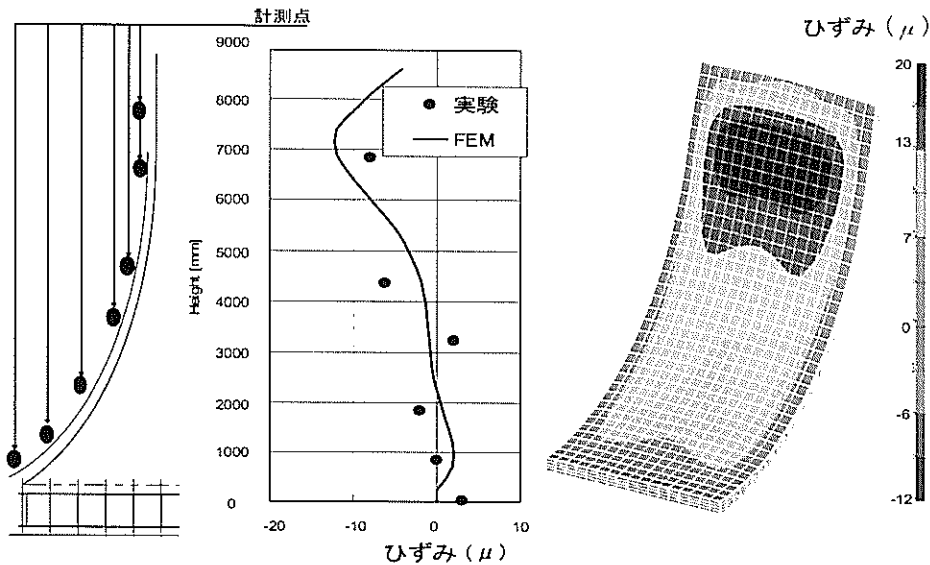


図-33 圧力負荷試験と発生ひずみ量

C1の収縮ひずみ量は、V1よりも小さかった。また、鉄筋コンクリートの収縮量の計算値⁶⁾と比較しても小さかった。これは、孔あき鋼板リブによるコンクリートの拘束効果と曲面壁の形状特性が複合的に作用したことが原因であると考えられる。図-32に示す結果に基づいて定式化した曲面壁の収縮ひずみ量の推定式を式(6)に示す。

$$\epsilon'_{cs}(t, t_0) = \left[1 - \exp\{-0.168(t - t_0)^{0.32}\} \right] \epsilon'_{sh} \quad (6)$$

ここに、

$\epsilon'_{cs}(t, t_0)$: 材齢 t_0 から t までの収縮ひずみ量

ϵ'_{sh} : 収縮ひずみの最終値⁶⁾

5.4 圧力負荷試験

模型に圧力を負荷した状態で、外壁に発生するひずみを測定した。また、曲面部と平面部のそれぞれで得られた結果を比較し、曲面壁の構造特性を検討した。

荷重は、完全密閉状態にした模型内部に外部から空気を注入して圧力を負荷した。最大空気圧の強度は20kPaとして、引波荷重時に近い負荷状態を再現した。ひずみ測定位置と結果を図-33に示す。測定位置は曲面壁側の曲面部と平面部の2箇所を鉛直方向とした。また、同時にFEM解析も実施し、測定結果と解析結果を比較した。

図-33に示したように、測定値と解析値はほぼ近い結果となり、両者とも平面部のひずみが大きかった。また、曲面版部分の剛性が平面版部分よりも若干高くなった。これらは、4.で示した解析結果と一致していた。

6. 防波堤ケーソンとしての試設計

試行的に曲面版ハイブリッドケーソンを適用した防波堤の基本設計を実施し、RCケーソンとの比較検討を行った。

6.1 検討条件

外洋に位置する水深-40mの大水深防波堤を想定した。防波堤の総延長は44mとした。ただし周囲に群島があり、外洋からの波浪は侵入しにくいと仮定した。想定した防波堤の設計条件を表-7に示す。ここでは、水深に比して、波浪条件は比較的ゆるやかなものを仮定した。

表-7 試設計条件

1. 潮位	H.H.W.L.	+0.80	m
	H.W.L.	+0.40	m
	L.W.L.	±0.0	m
2. 水深		-40	m
3. 防波堤計画施工延長		44	m
4. 波浪	完成時	$H_{1/3}$	4.0 m
		H_{max}	7.0 m
		$T_{1/3}$	9.0 s
		波向	0° (補正後)
5. 設計震度 (動水圧算定時)		0.10	
6. 計画高	堤体天端高	+2.60	m
	ケーソン天端高	+1.00	m

6.2 検討方針

防波堤建設の際の主要な現地工事として、次の5種類がある。

- ① 基礎工
- ② 被覆工
- ③ 根固工
- ④ ケーソン据付工
- ⑤ 中詰工

今回の試設計では、大水深海域を想定したため、基礎工の工事費が全体工事費の中で大きな割合を占めると予想される。また、比較的厳しい施工条件を想定したので、ケーソンの据付費用も高くなることが予想される。したがって、想定海域において防波堤を経済的に建設するため、基礎工とケーソン据付工の施工量を削減することを検討方針とした。

基礎工の施工量を削減するため、ケーソン高さをできるだけ高くして、基礎マウンド高を低くした。基礎マウンド高を低くすれば、被覆材と根固ブロックの重量削減も図ることができるので、現地施工費の削減にもつながる。ただし、ケーソン高を高くすれば転倒モーメントが大きくなるため、ケーソン底面の端し圧が大きくなり、基礎マウンドの安定性を損なうことが考えられる。この

対策として、ケーソン底面幅を広くとることにより地盤反力の増大を回避し、広い範囲に分散させるように配慮した。

さらに、ケーソン据付施工量を削減するため、具体的には1函あたりのケーソン長を長くすることによりケーソンの据付回数を少なくし、据付コストの削減を図った。ただし、ケーソン長を長くすると、ケーソン質量も大きくなるので、ケーソンの進水と据付けに要する施工機械の能力や中詰材の施工能力も考慮して、ケーソン長を決定した。

6.3 試設計結果

(1) 標準断面

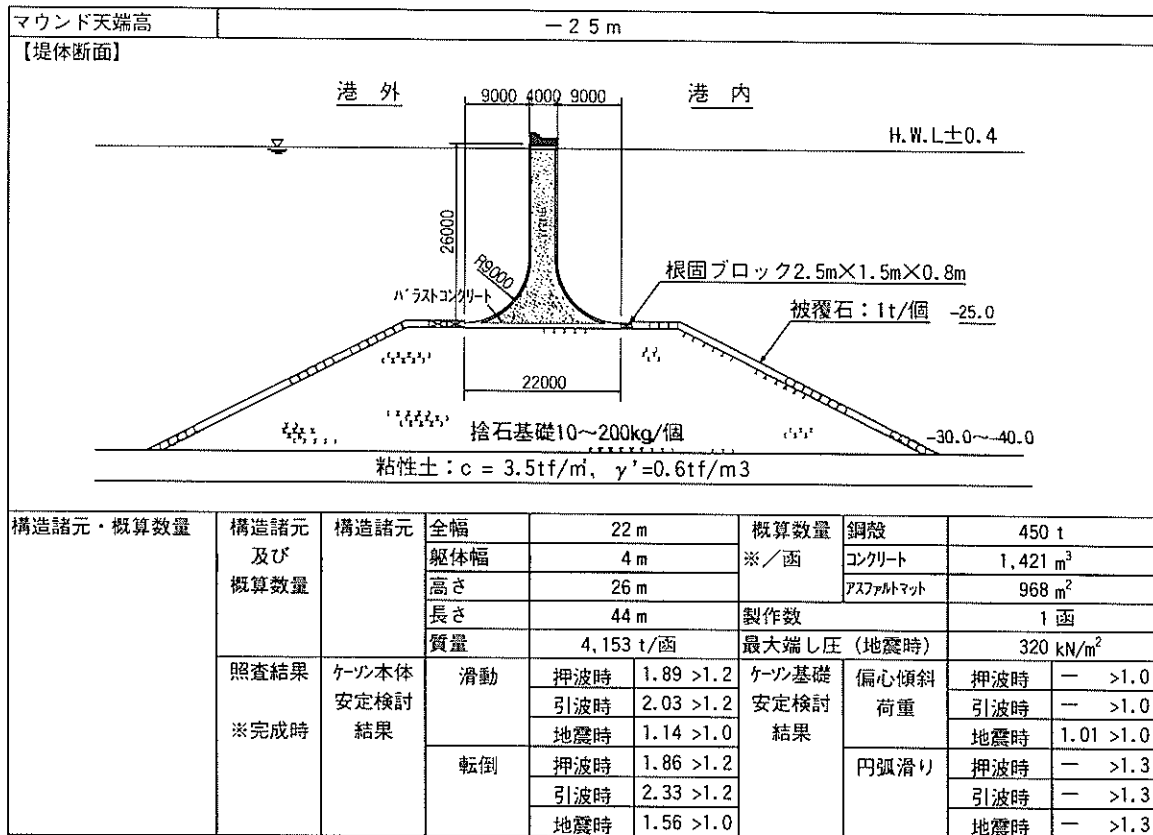
RCケーソンの試設計結果を表-8に、曲面版ハイブリッドケーソンの試設計結果を表-9に示す。

RCケーソンの構造形式は、底面幅を広くとることができるバットレス形式とした。ケーソンの断面は、安定性と端し圧を考慮して決定した。基礎の支持力は、端し圧強度に関係なく偏心傾斜荷重による安定性を確保できるようにすればよい⁴⁾が、一般的な事例を参考に、最大端し圧が800kN/m²を十分下回るようにフーチング長を決定した。基礎マウンド高は-20mとし、1函あたりのケーソン

表-8 RCケーソン基本試設計結果

マウンド天端高		-2.0 m						
【堤体断面】								
		港外		港内		H.W.L±0.4		
		4400		4400		4400		
		上部工						
		21000						
		根固ブロック4.0m×2.5m×1.2m		根固ブロック3.0m×2.5m×1.0m		-20.0		
		※有孔型24.84t/個		※有孔型15.64t/個				
		被覆石：1t/個						
		1:2		1:2		-30.0~-40.0		
		捨石基礎10~200kg/個		摩擦増大マツト(10cm厚)		13200		
						粘性土：c = 3.5tf/m ² , γ' = 0.6tf/m ³		
構造諸元・概算数量	構造諸元及び概算数量	構造諸元	全幅	13.2 m	概算数量	鋼殻	0 t	
			躯体幅	4.4 m	※/函	コンクリート	653 m ³	
			高さ	21 m		アスファルトマツト	194 m ²	
			長さ	14.7 m	製作数	3 函		
			質量	1,645 t/函	最大端し圧	647 kN/m ²		
照査結果 ※完成時	ケーソン本体 安定検討 結果	滑動	押波時	1.76 > 1.2	ケーソン基礎 安定検討 結果	偏心傾斜 荷重	押波時	— > 1.0
			引波時	2.11 > 1.2			引波時	— > 1.0
			地震時	1.27 > 1.0			地震時	1.02 > 1.0
		転倒	押波時	1.39 > 1.2		円弧滑り	押波時	— > 1.3
			引波時	1.74 > 1.2			引波時	— > 1.3
			地震時	1.29 > 1.0			地震時	— > 1.3

表-9 曲面ハイブリッドケーソン基本試設計結果



ン長は14.7mとした。ケーソン1函あたりの質量は、1645tとなり、防波堤延長44mを構成するのに要するケーソンの函数は3函となった。

曲面版ハイブリッドケーソンによる防波堤の断面もRCケーソンと同様に決定した。曲面壁に作用する波力に関しては十分に明らかにされていないので、ここでは直立壁に作用する波力と同じものを用いた。実際は、曲率により波力の鉛直成分が期待できるので、ケーソンの安定性の観点からはさらに有利であることも想定される。

フーチング長は、4.2の検討結果に基づいて、剛体性を十分確保できる9mとした。最大端し圧は320kN/m²となった。基礎マウンド高はRCケーソンよりも低い-25mとして、マウンド施工量の低減を図った。1函あたりのケーソン長は、据付を1回で完了することを目的として、防波堤の総延長と同じ44mとした。ケーソン1函あたりの質量は4153tとなった。

(2) ケーソンの施工方法

RCケーソンは、据付現場から約35km離れた陸上ヤードで製作し、フローティングクレーン（以下FCと略称する）を用いることとした。

曲面版ハイブリッドケーソンの施工方法を図-34に示

す。ケーソン1函あたりの質量は4153tであるため、陸上ヤードで全てを製作した場合、FCで進水させることは困難である。したがって、鋼殻とコンクリート構造から構成されるハイブリッド構造の特徴を活かして、各々を別の場所で製作するものとした。すなわち、鋼殻は陸上ヤードで製作して現地海域まで輸送し、フローティングドック（以下FDと略称する）に載せるものとした。

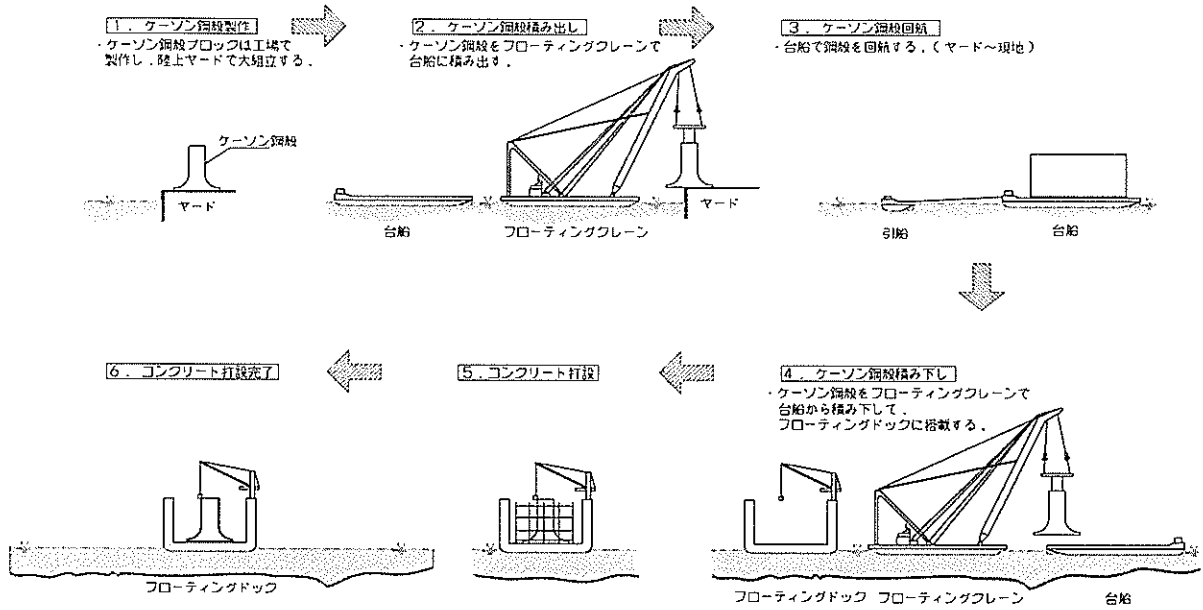
コンクリート打設と進水はFDから行い、据付場所まで直接曳航した後、据付は起重機船・引船併用方式で行うものとした。

(3) 経済性の比較

防波堤建設コストの比較結果を表-10に示す。建設コストとしては、直接工事費⁹⁾のみを計上した。その際、鋼殻製作に関する工事費は、ハイブリッドケーソン製作工積算基準⁷⁾に準拠して算定した。

RCケーソン防波堤に対する曲面版ハイブリッドケーソン防波堤の建設費低減効果は、基礎工において最も顕著に現れた。その他の項目でもおおむね建設費低減効果が現れているが、本体工2に示す鋼殻製作コストが全体の低減効果を圧迫する結果となった。それでも、建設費の全体額に対しての低減効果は、-13%程度となった。

1) ケーソン製作



2) ケーソン進水・据付

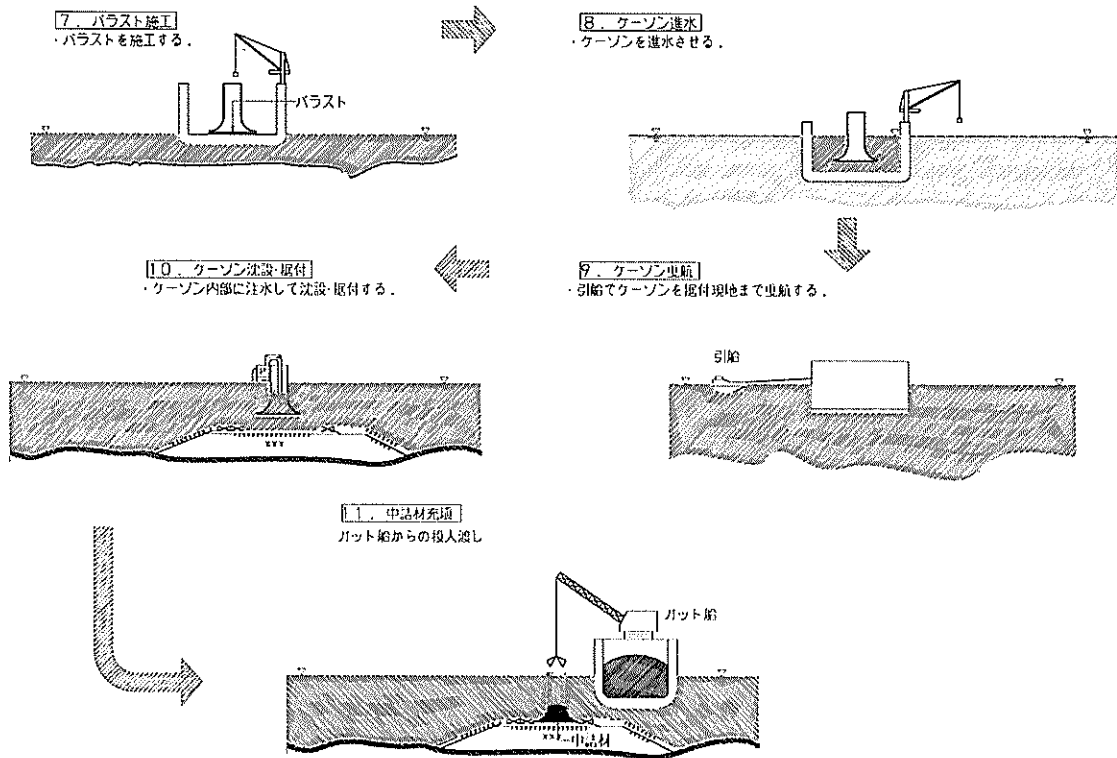


図-34 曲面版ハイブリッドケーソン施工フロー

表-10 経済性比較

	RC ケーソン	曲面版ハイブリ ッドケーソン	比 較
基礎工	1	0.70	-0.30
本体工	1	1.22	+0.22
上部工	1	0.92	-0.08
被覆工	1	0.74	-0.26
根固工	1	1.11	+0.11
工事費計	1	0.87	-0.13
1mあたり 工事費計	1	0.84	-0.16
工事費比率 /RC工費	1	0.87	-0.13

このように、建設費の低減が期待され、経済性にも曲面形状の効果を発揮できる可能性が高いことがわかった。

7. 結 論

本研究の結果、得られた主要な結論は、次のとおりである。

- 1) 分布荷重に対するハイブリッド曲面版の終局強度と破壊エネルギーは、ハイブリッド平面版やRC版よりも大きかった。
- 2) ハイブリッド曲面版の破壊はモードを変えながら進行し、RC版やハイブリッド平面版と比較して粘り強い破壊過程を示した。
- 3) 集中荷重作用時における最大残留耐荷力の終局荷重に対する割合は、ハイブリッド平面版では74%を示し、ハイブリッド曲面版では平均93%を示した。また、ハイブリッド曲面版のエネルギー吸収性能はハイブリッド平面版よりも大きかった。
- 4) 曲面版ハイブリッドケーソンの外壁では、曲率半径を大きくするにしたがって発生応力は減少し、局所的な応力集中も緩和された。
- 5) ハイブリッド曲面壁の有効幅を簡易的に推定する式を提案した。
- 6) フーチング長さが10m以下であれば、フーチングを剛体とみなすことできた。
- 7) 実物大部分模型の製作により、曲面鋼板の合理的な製作方法を考案した。
- 8) 孔あき鋼板リブのずれ止めもしくは補強材への適用性を確認した。また曲面型枠内へのコンクリート打設は、流動化剤を使用することにより問題なく施工することができた。

9) ハイブリッド曲面壁のコンクリートの収縮ひずみ量は、直立壁よりも小さくなった。また簡易的に推定する式を提案した。

10) 防波堤の建設を例にとり、曲面版ハイブリッドケーソンまたはRCケーソンを使用した場合における経済性の比較を行い、建設費低減の可能性のあることを示した。

(2002年5月30日受付)

謝 辞

本資料は、当時の運輸省（国土交通省）港湾技術研究所と日立造船株式会社が平成11～12年度に実施した共同研究「曲面合成版外壁構造ケーソンの構造設計法及び施工法に関する研究」の成果に基づくものである。研究の実施にあたって、関係各位の御協力をいただきましたことに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 横田 弘：鋼・コンクリートハイブリッド構造の力学特性ならびに海洋構造物への適用性に関する研究、港湾技研資料、No.750、1993年6月、191p.
- 2) 沿岸開発技術研究センター：ハイブリッドケーソン設計マニュアル、1999年6月
- 3) 中井 博、北田俊行：鋼橋設計の基礎、共立出版株式会社、1992年、p.122およびp.247
- 4) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説、1999年4月、p.377、pp.426～429
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、IV下部工編、1994年2月、p.181
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕、2002年
- 7) 港湾空港建設技術サービスセンター：ハイブリッドケーソン製作工積算基準、2001年4月
- 8) 日本港湾協会：港湾土木請負工事積算基準、2001年4月
- 9) 日本道路協会橋梁委員会下部構造小委員会：道路、1983年5月、p.70
- 10) Oguejiofor et al.: Perfobond Rib Connectors for Composite Beams, Composite Construction in Steel and Concrete, Proceedings of Engineering Foundation Conference, ASCE, Potosi, pp.883-898, 1992
- 11) Leonhardt, F. et al.: Neues, vorteilhaftes Verbundmittel für Stahlverbund-Tragwerke mit hoher Dauerfestigkeit, Beton- und Stahlbetonbau, Vol.82, No.12, December 1987, pp.325-331

付録 曲面版ハイブリッドケーソンの設計に関する資料

曲面版ハイブリッドケーソンの設計に必要な知見を、本文の検討結果に基づいて考察し、ここに資料としてとりまとめる。曲面版ハイブリッドケーソンは、本文において述べたとおり、外壁にオープンサンドイッチタイプの鋼・コンクリート合成版、底版にSRC版、隔壁に鋼補剛板を適用しており、従来のハイブリッドケーソンの設計手法の大部分が適用できると考えている。したがって、ここでは曲面版ハイブリッドケーソンに特有の項目についてのみ記述する。

従来のハイブリッドケーソンの設計に関しては、港湾の施設の技術上の基準・同解説¹⁾を補足するための参考資料として、沿岸開発技術研究センターから設計マニュアル²⁾が発刊されている。本資料は、このマニュアルの目次構成の章節番号を踏襲して記述している。

3. 構造諸元

3.2 ハイブリッド曲面版部の形状寸法

ハイブリッド曲面版の曲率およびフーチングの形状・寸法は、構造物としての機能、安全性および施工性を考慮して定める。

5. 材 料

5.3 ずれ止め

(1) 曲面版部の鋼板と鉄筋コンクリートとの一体化に使用するずれ止めには、原則として孔あき鋼板リブを使用する。孔あき鋼板リブの形状を図-5.3.1(a)に示す。

孔あき鋼板リブは、JIS規格に適合する帯状鋼板を用いることを標準とする。また、孔の径および間隔は、コンクリートが十分に充填できるように設定しなければならない。

(2) ずれ止めにスタッドを用いる場合は、図-5.3.1(b)に示す頭付きスタッド（スタッドジベル）を使用することを原則とする。

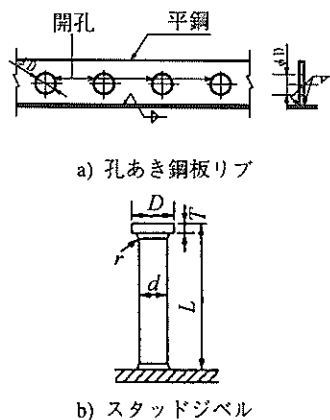


図-5.3.1 ずれ止めの形状

7. 細部設計

7.2 設計に用いる断面力

7.2.1 フーチング

フーチングの断面力は、フーチングを隔壁、底版、および曲面壁から構成される箱型構造（図-7.2.1）とみなして計算してよい。

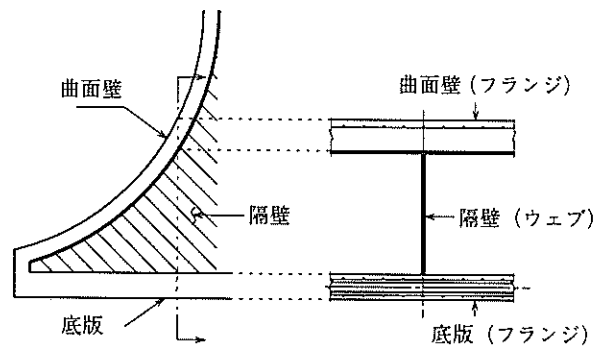


図-7.2.1 フーチングの構造

7.2.2 底版

- (1) 断面力は、4辺固定版（図-7.2.2）として計算してよい。
- (2) 4辺固定版のスパンは、支持部材の中心間隔とする。支持部材は、隔壁および曲面壁先端部（図-7.2.2）とする。
- (3) 設計断面力は、(1)で算定した断面力に加えて、7.2.1のフーチング作用による断面力も考慮して決定する。
- (4) せん断力の計算は、版の荷重分担の仮定に基づいて行う。

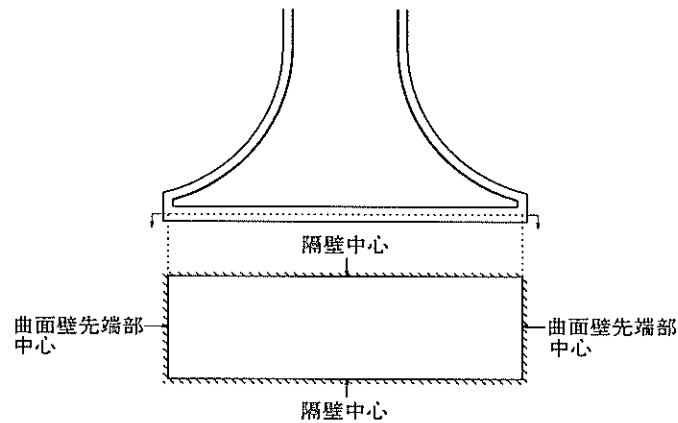


図-7.2.2 底版断面力算定モデル

7.2.3 外壁

- (1) 断面力は、シェル理論を用いた解析モデル（図-7.2.3）で算定する。その際の境界条件は、3辺固定1辺自由とする。
- (2) 3辺固定1辺自由シェルのスパンは、支持部材の中心間隔とする。支持部材は隔壁および曲面壁先端部（図-7.2.3）とする。
- (3) 設計断面力は、(1)で算定した断面力に加えて、7.2.1のフーチング作用による断面力も考慮して決定する。
- (4) せん断力の計算は、版の荷重分担の仮定に基づいて行う。

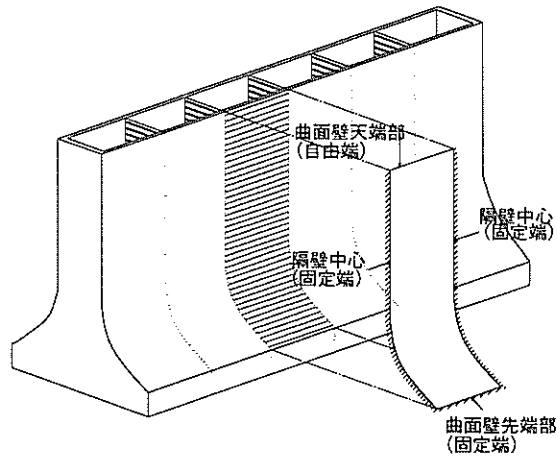


図-7.2.3 曲面外壁断面力算定モデル

7.3 終局限界状態の検討

7.3.1 ハイブリッド曲面版部

7.3.1.3 膜力に対する安全性の照査

(1) 膜力が作用する部材の安全性の照査³⁾においては、次式を満足しなければならない。

$$\frac{\gamma_i N_d}{N_{ud}} \leq 1.0$$

ここに、

γ_i : 構造物係数

N_d : 設計膜力

N_{ud} : 設計膜耐力

(2) 設計膜耐力 N_{ud} は、次式により計算する。

$$N_{ud} = N(f_d) / \gamma_b$$

ここに、

$N(f_d)$: 材料の設計強度 f_d に対する膜耐力

γ_b : 部材係数

(3) 膜耐力 $N(f_d)$ は、以下の仮定に基づいて求めてよい。

- 1) コンクリートの引張応力を無視し、維ひずみは断面の中立軸からの距離に比例する。
- 2) コンクリートの応力-ひずみ曲線は、コンクリート標準示方書⁴⁾による。
- 3) 鋼材の応力-ひずみ曲線は、コンクリート標準示方書⁴⁾による。
- 4) 鋼板に圧縮応力が生じる場合は、次式により圧縮鋼板厚を鋼板の座屈を考慮した等価厚さに換算する。

$$t_{eq} = \frac{t_f^2}{b} \sqrt{E_s / f'_{yd}}$$

ここに、

t_{eq} : 圧縮鋼板の等価厚さ

t_f : 圧縮鋼板の厚さ

b : 部材軸方向に配置された補鋼材の間隔 (スタッド間隔)

E_s : 圧縮鋼板のヤング係数

f'_{yd} : 圧縮鋼板の設計圧縮降伏強度

$$f'_{yd} = f'_{yk} / \gamma_s$$

f'_{yk} : 鋼材の圧縮降伏強度の特性値

γ_s : 材料係数

5) 部材断面のひずみがすべて圧縮となる場合以外は、コンクリートの圧縮応力度の分布をコンクリート標準示方書⁴⁾に示す長方形圧縮応力度の分布（等価応力ブロック）と仮定してよい。

7.3.1.4 ずれ止めのせん断伝達耐力の検討

(1) 鋼板とコンクリートの境界面に発生する水平ずれのうち、図-7.3.3に示すx方向成分は孔あき鋼板リブ本体のせん断耐力で伝達し、y方向成分は孔あき鋼板リブの孔に充填されたコンクリートのせん断耐力で伝達する。

(2) 鋼板とコンクリートの境界面に水平ずれ力が作用する部材は、直交2方向成分において次式を満足しなければならない。

$$\frac{\gamma_i Q_{dx}}{Q_{udx}} \leq 1$$

$$\frac{\gamma_i Q_{dy}}{Q_{udy}} \leq 1$$

ここに、

γ_i : 構造物係数

Q_{dx} : 鋼板とコンクリートの単位境界面積あたりにおける設計水平ずれ力のx方向成分

Q_{dy} : 鋼板とコンクリートの単位境界面積あたりにおける設計水平ずれ力のy方向成分

Q_{udx} : 鋼板とコンクリートの単位境界面積あたりに配置された孔あき鋼板リブ本体の設計水平せん断耐力

Q_{udy} : 鋼板とコンクリートの単位境界面積あたりに配置された孔あき鋼板リブ開孔部における充填コンクリートの設計水平せん断耐力

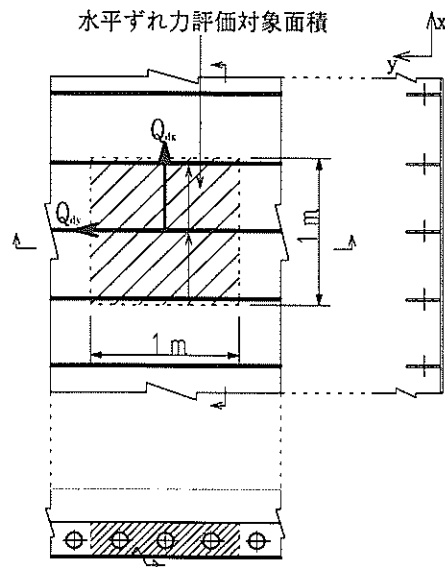


図-7.3.3 孔あき鋼板リブによるずれ止め機構

(3) ずれ止めの設計耐力は次式により評価する。

1) 孔あき鋼板リブ本体の設計水平せん断耐力

$$Q_{udy} = A f_{vyd} / \gamma_b$$

ここに、

A : 鋼板とコンクリートの単位境界面積における孔あき鋼板リブの有効せん断抵抗総面積 (mm^2)

f_{vyd} : 孔あき鋼板リブの設計せん断降伏強度 (N/mm^2)

γ_b : 部材係数

2) 孔あき鋼板リブ開孔部における充填コンクリートの設計せん断耐力

$$Q_{udx} = n_x \Delta Q_{udx} / \gamma_b$$

ここに、

ΔQ_{udx} ：孔1個あたりの設計せん断耐力⁵⁾ (N)

$$(\approx 3.38 d^2 f'_{cd} \sqrt{t/d} - 39.0)$$

ただし、 $22.0 < d^2 f'_{cd} \sqrt{t/d} < 194.0$

d ：孔あき鋼板リブの開孔径 (mm)

t ：孔あき鋼板リブの板厚 (mm)

f'_{cd} ：コンクリートの設計圧縮強度 (N/mm²)

n_x ：鋼板とコンクリートの単位境界面積に配置された孔あき鋼板リブの総開孔数

γ_b ：部材係数

7.3.2 SRC部

7.3.2.3 膜力に対する安全性の照査

(1) 膜力が作用する部材の安全性の照査においては、次式を満足しなければならない。

$$\frac{\gamma_i N_d}{N_{ud}} \leq 1.0$$

ここに、

γ_i ：構造物係数

N_d ：設計膜力

N_{ud} ：SRC部材の設計膜耐力

(2) 設計膜耐力 N_{ud} は、鉄骨端部が十分に定着されていることを前提に、鉄骨を鉄筋に換算して、鉄筋コンクリート部材と同様に次式により計算してよい。

$$N_{ud} = N(f_d) / \gamma_b$$

ここに、

$N(f_d)$ ：材料の設計強度 f_d に対する膜耐力

γ_b ：部材係数

(3) 膜耐力 $N(f_d)$ の計算は、以下の仮定に基づいてよい。

- 1) コンクリートの引張応力を無視し、縦ひずみは断面の中立軸からの距離に比例する。
- 2) コンクリートの応力-ひずみ曲線は、コンクリート標準示方書⁴⁾による。
- 3) 鋼材の応力-ひずみ曲線は、コンクリート標準示方書⁴⁾による。
- 4) 部材断面のひずみがすべて圧縮となる場合以外は、コンクリートの圧縮応力度の分布は、コンクリート標準示方書³⁾に示す長方形圧縮応力度の分布（等価応力ブロック）と仮定してよい。

7.3.4 隅角部

隅角部は、断面力を円滑、確実に伝達でき、かつ、製作・施工が容易な構造とする。

(1) 曲面版ハイブリッドケーソンでは、図-7.3.12に示すように、種々のタイプの隅角部が形成される。隅角部の構造は、在来のRCケーソンの隅角部構造などを参考に、断面力が部材相互に確実に伝達されるように定める。

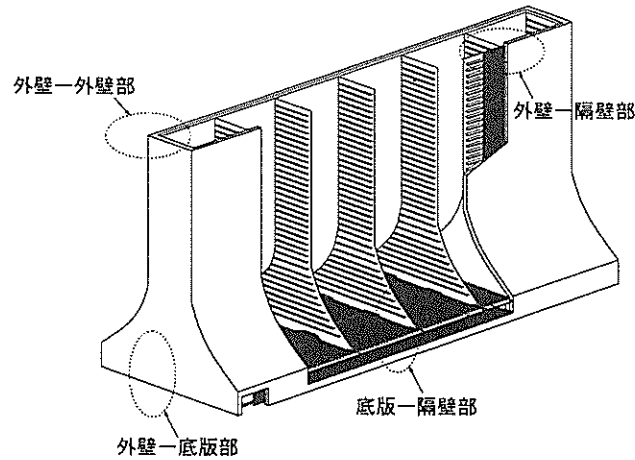


図-7.3.12 曲面版ハイブリッドケーソンの隅角部

(2) 各隅角部の構造例と耐力照査式

1) 外壁-隔壁部

隔壁から伝達される抜け出し荷重による外壁鋼板のコンクリートからのはく離は、孔あき鋼板リブ開孔部のせん断耐力で防止する。図-7.3.13に接合部の構造例を示す。せん断耐力は、ガセットプレート裏面に位置する開孔部で発揮する。はく離耐力は、次式で算定する。

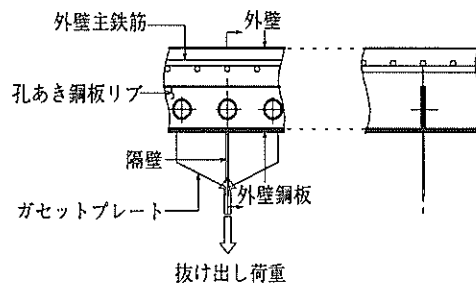


図-7.3.13 外壁-隔壁接合部の構造

$$\frac{\gamma_t P}{P_u} \leq 1.0$$

ここに、

γ_t ：構造物係数

P ：隔壁から伝達される設計抜け出し力 (N)

P_u ：孔あき鋼板リブ開孔部の総せん断耐力 (N)

$$P_u = n \Delta Q_{uds} / \gamma_b$$

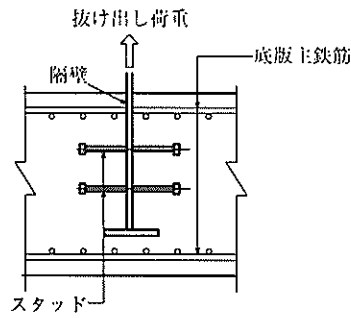
ΔQ_{uds} ：7.3.1.4(3)に示した開孔1個あたりの設計水平せん断耐力

n ：設計抜け出し力に対してせん断耐力が有効に発揮される孔あき鋼板リブの開孔数

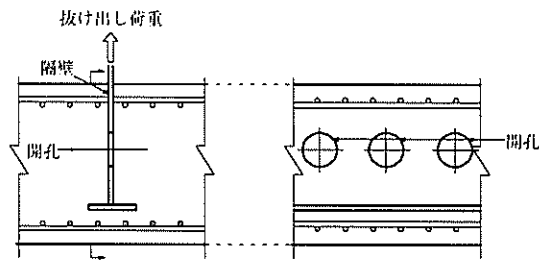
γ_b ：部材係数

2) 底板-隔壁部

接合部の構造例を図-7.3.14に示す。隔壁から伝達される抜け出し荷重によって、隔壁が底板から抜け出すのを防止するため、隔壁の底板コンクリート根入れ部分にスタッドもしくは開孔を配置する。



a) スタッドを配置する場合



b) 開孔を配置する場合

図-7.3.14 底版-隔壁接合部の構造

・スタッドを配置する場合の照査

$$\frac{\gamma_i P}{P_u} \leq 1.0, \quad \frac{\gamma_i P}{Q_{ud}} \leq 1.0$$

ここに、

γ_i ：構造物係数

P ：隔壁から伝達される設計抜け出し力

P_u ：底版コンクリートのコーン破壊耐力

Q_{ud} ：スタッドの設計水平せん断伝達耐力

・開孔を配置する場合の照査

$$\frac{\gamma_i P}{P_u} \leq 1.0$$

ここに、

γ_i ：構造物係数

P ：隔壁から伝達される設計抜け出し力

P_u ：1)に示した孔あき鋼板リブ開孔部の総せん断耐力

3) 外壁-底版部

図-7.3.15にスタッドもしくは開孔を配した構造例を示す。断面照査は底版-隔壁部と同様に行う。

4) 外壁-外壁部

図-7.3.16に接合部の構造例を示す。

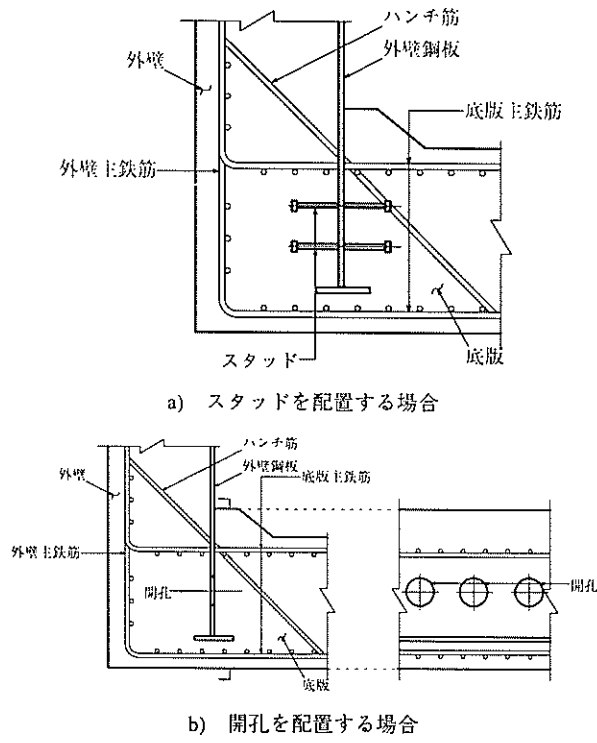


図-7.3.15 外壁-底版接合部の構造

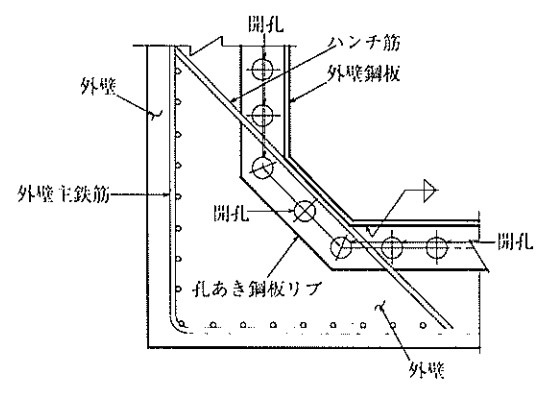


図-7.3.16 外壁-外壁接合部の構造

付録参考文献

- 1) 運輸省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，日本港湾協会，1999年4月
- 2) 沿岸開発技術開発センター：ハイブリッドケーソン設計マニュアル，1999年6月
- 3) 土木学会：複合構造物設計・施工指針（案），1997年10月，pp.67～69
- 4) 土木学会：2002年制定 コンクリート標準示方書 [構造性能照査編]，2002年3月
- 5) 保坂鐵矢，光木 香，平城弘一，牛島祥貴，橋 吉宏，渡辺 滉：孔あき鋼板ジベルのせん断特性に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.46A，土木学会，2000年3月，pp.1593～1604

港湾空港技術研究所資料 No.1030

2002.9

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL.0468(44)5040 URL.<http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社東京プリント

Copyright © (2002) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この技術資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事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。