

運輸省港灣技術研究所

# 港灣技術研究所 報告

---

---

REPORT OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH  
INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT

---

VOL. 29      NO. 2      JUNE 1990

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

# 港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第29巻 第2号 (Vol. 29, No. 2), 1990年6月 (June 1990)

## 目 次 (CONTENTS)

1. 斜め入斜波による混成堤マウンド被覆材の安定性に関する実験的研究  
.....高橋重雄・木村克俊・谷本勝利..... 3  
(Stability of Armour Units of Composite Breakwater Mound against  
Oblique Waves.  
.....Shigeo TAKAHASHI, Katsutoshi KIMURA  
and Katsutoshi TANIMOTO)
2. 碎波帯内の底質粒度の変動特性  
——波崎海洋研究施設における現地調査——  
.....加藤一正・柳嶋慎一・栗山善昭・磯上知良・村上裕幸・藤田 誠.....37  
(Changes of Grain Distribution of Bed Material in the Surf Zone  
——Field Observation at Hazaki Oceanographical Research Facility——  
.....Kazumasa KATOH, Shin-ichi YANAGISHIMA, Yoshiaki KURIYAMA,  
Tomoyoshi ISOGAMI, Hiroyuki MURAKAMI and Makoto FUJITA)
3. 粘性土の水平方向圧密係数の決定法  
.....小林正樹・水上純一・土田 孝.....63  
(Determination of the Horizontal Coefficient of Consolidation  $c_h$   
.....Masaki KOBAYASHI, Jun-ichi MIZUKAMI and Takashi TSUCHIDA)
4. 事前混合処理工法による処理土の強度・変形特性  
.....善 功企・山崎浩之・佐藤 泰.....85  
(Strength and Deformation Characteristics of Cement Treated  
Sands Used for Premixing Method  
.....Kouki ZEN, Hiroyuki YAMAZAKI and Yasushi SATO)
5. 低置換率 SCP 工法により改良された粘性土地盤の支持力  
.....寺師昌明・北詰昌樹... 119  
(Bearing Capacity of Clay Ground Improved by Sand Compaction  
Piles of Low Replacement Area Ratio  
.....Masaaki TERASHI and Masaki KITAZUME)
6. 曲げおよびせん断を受けるハイブリッドはりの耐力特性  
.....横田 弘・清宮 理... 149  
(Load Carrying Capacity of Hybrid Beams Subjected to Flexure  
and Shear Forces.....Hiroshi YOKOTA and Osamu KIYOMIYA)
7. ケーソンに作用する地震時土圧に関する模型振動実験とその解析  
.....風間基樹・稲富隆昌・大塚幸治... 177  
(Model Vibration Tests for the Seismic Earth Pressure Acting  
on the Rigid Caisson Foundation and Its Analyses  
.....Motoki KAZAMA, Takamasa INATOMI and Kohji OHTSUKA)

## 6. 曲げおよびせん断を受ける ハイブリッドはりの耐力特性

横田 弘\*・清宮 理\*\*

### 要 旨

コンクリートと鋼材によるハイブリッド構造は、鋼材とコンクリートの各々の長所を最大限に発揮させると共に、短所を相互に補い合う構造様式である。海洋環境下でのハイブリッド構造の形式は、鋼板とコンクリートとをずれ止めで合成したものである。鋼板は、部材の両側に用いる場合と片側のみを用いる場合がある。また、ずれ止めには形鋼を利用する。ハイブリッド部材の採用により力学特性の向上、構造物の軽量化、施工の迅速化などが図られる。

しかし、この形式の構造では、ずれ止めの箇所にひびわれが集中し、適切なせん断補強を施さないと計算耐力よりも低い荷重でせん断破壊が生じる。したがって、ハイブリッド部材の曲げおよびせん断耐荷機構を明らかにし、有効なせん断補強方法を確立しなければならない。また、そのせん断補強を有するはりの耐力の算定方法を検討する必要がある。

本報告では、鋼板を引張側のみにしたものと圧縮側および引張側の両側に設けたものの2種類のはり試験体を対象とした載荷試験により得られた結果について述べる。さらに、試験結果に基づき、ハイブリッドはりの構造設計法について考察を行なった。構造設計法として、ハイブリッドはりの曲げ耐力、せん断耐力、座屈耐力およびひびわれ幅の算定法を本報告で提示した。

キーワード：ハイブリッド部材、曲げ、せん断、ひびわれ、載荷試験

\* 第二港湾建設局 横浜調査設計事務所次長（元構造部主任研究官）

\*\* 構造部 構造強度研究室長

## 6. Load Carrying Capacity of Hybrid Beams Subjected to Flexure and Shear Forces

Hiroshi YOKOTA\*

Osamu KIYOMIYA\*\*

### Synopsis

Hybrid structures with steel plates and concrete have considerable potential for use in offshore facilities. In the structure, steel plates will be seen either on one surface only or both surfaces of structural members. Angles, wide flange shapes, and other steel shapes are used as shear connectors which will make the steel plate compose tightly with concrete. By replacing reinforcing bars with the steel plates, the structural performance of the member can be almost unchanged and the cost of form work and the period of construction can be considerably saved.

For the hybrid structures, adequate shear reinforcement is required because the shear connectors will inevitably initiate cracks. Flexural and shear resisting mechanisms have to be fully investigated and new methods of shear reinforcement have to be developed.

This paper presents the results of flexural and shear loading tests on hybrid beams with newly proposed shear reinforcements. Furthermore, load carrying mechanisms against shear and flexural forces are investigated and their design methods are established based on the test results.

**Key Words:** Hybrid Structure, Flexure, Shear, Crack, Loading Tests

---

\* Deputy Head of Yokohama Investigation and Design Office (Second District Port Construction Bureau, X-Structural Engineering Division)

\*\* Chief of Structural Mechanics Laboratory, Structural Engineering Division

## 目 次

要 旨	149
1. ま え が き	153
2. ハイブリッド構造の概要	153
2.1 ハイブリッド構造の定義	153
2.2 ハイブリッド構造の力学	154
2.3 ハイブリッド構造の設計	156
2.4 海洋環境下でのハイブリッド構造の特徴	156
2.5 海洋構造物への適用例	157
3. 載 荷 試 験	158
3.1 試験体	158
3.2 材料の特性	159
3.3 試験方法と計測方法	161
4. 載荷試験の結果と考察	163
4.1 ひびわれおよび破壊の状況	163
4.2 はりのたわみ	163
4.3 鋼材に生じたひずみ	165
4.4 ひびわれ幅	169
5. ハイブリッドはりの構造設計法	171
5.1 曲げ耐力の算定	171
5.2 座屈耐力の算定	172
5.3 せん断耐力の算定	172
5.4 ひびわれ幅の算定	173
6. 結 論	174
7. あ と が き	174
参 考 文 献	174

## 1. まえがき

コンクリートと鋼板を組合せたハイブリッド構造は、鋼材とコンクリートのそれぞれの長所を生かしかつ短所を補い合う構造様式である。構造物の合理性および経済性の観点から、橋梁の上部工などの陸上構造物を中心にいくつかの適用事例がみられる。一方、港湾・海洋構造物では、従来鋼材あるいは鉄筋コンクリートが用いられ、ハイブリッド構造が採用された例は少ない。浮体構造物などに若干の適用例が見られるにすぎない。しかし、今後の大水深海域での海洋開発に伴い、防波堤などの外郭施設や沈埋トンネルなどのアクセス施設への適用が積極的に進められている。

ハイブリッド構造を港湾・海洋構造物に適用する場合には、耐力や変形性能などの力学特性の向上、鋼板による水密性の確保、軽量化、型枠・支保工の簡略化による工期の短縮などの利点が期待できる。これらの利点は、非常に厳しい環境条件下に建設される海洋構造物において、安全性と経済性の両者の要求を満たせるものであると考えられる。

ハイブリッド構造には、これらの多くの利点があるものの、新しい構造様式であるため、設計手法が十分に確

立されていない。特に、港湾・海洋構造物への採用に当たっては、部材の力学特性や耐久性などを十分に把握して、海洋環境を考慮した設計体系を整備していく必要がある。

本報告では、ハイブリッド構造要素の力学特性を把握するため、各種の鋼材配置を行ったハイブリッドはりの静的載荷試験を行い、曲げおよびせん断力を受けた場合の力学特性や耐力の算定方法について考察を行った結果を述べる。特に、ハイブリッドはりでは、ずれ止めの箇所にはびわれが集中する傾向にあり、このような状況下でのハイブリッドはりの曲げおよびせん断耐力機能を明らかにし、有効なせん断補強方法を考察する。また、そのせん断補強を施したハイブリッドはりの曲げ耐力、せん断耐力、座屈耐力およびひびわれ幅の算定法を提案する。

## 2. ハイブリッド構造の概要

### 2.1 ハイブリッド構造の定義

ハイブリッド (Hybrid) 構造とは、異種材料を合成して得られる構造の総称で、単一の材料のみでは得ることのできない望ましい力学特性を有している。一般的に、ハイブリッド構造を「複合構造」と言い替えることがで

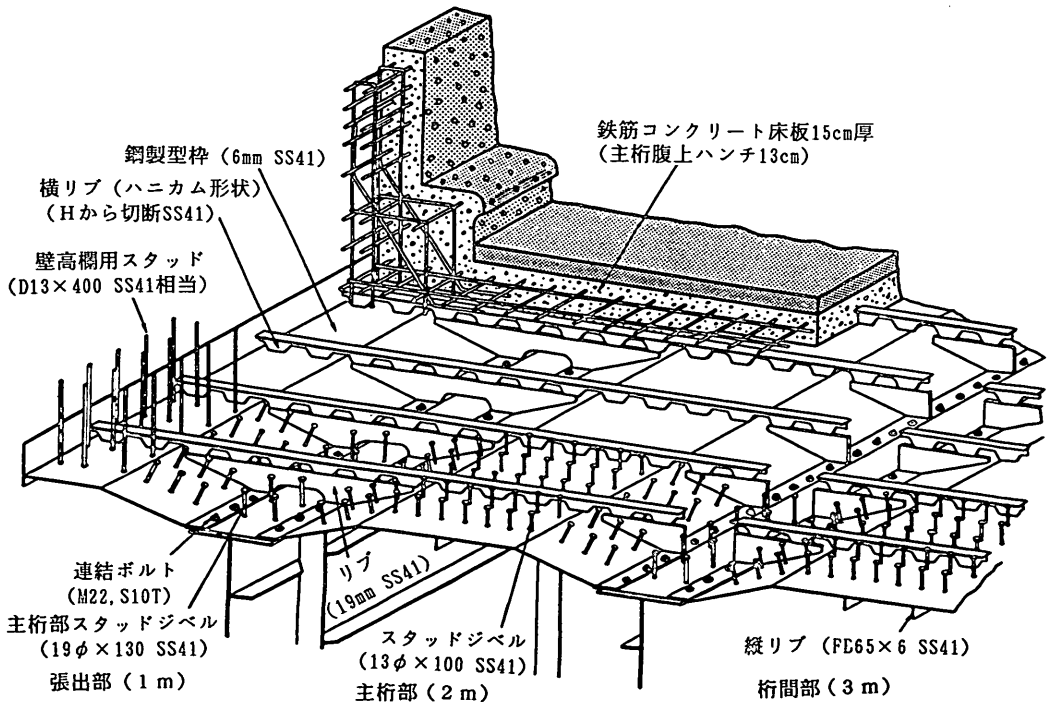


図-1 橋梁での合成床版の一例<sup>1)</sup>

きる。

建設用の材料として、鋼材、コンクリート、木材、石材などが多く用いられている。つまり、ハイブリッド構造の形態には、これらのさまざまな材料の組み合わせが考えられる。しかし現在のところ、経済面や実際面を考えると、鋼材（鋼板、形鋼、鋼管など）とコンクリート（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）との合成で得られる構造様式のみが現実的であることは議論の余地がない。鋼材は引張強度と塑性変形能力に優れているが、圧縮域では座屈に対する配慮が必要となる。また、腐食などによる耐久性の問題もある。一方、コンクリートは圧縮強度に比べて引張強度が著しく弱い。したがって、鋼材とコンクリートとを合成することによって、両者の短所を補い合い、経済的にも優れた構造様式を作ることが可能となる。

複合構造の定義には種々のものがあるが、大きく分けて「合成 (composite) 構造」および「混合 (mixed) 構造」の2種類がある。合成構造は、部材断面が異種材料の組み合わせによって構成され、これらが一体として作用するもので、合成桁、合成柱、合成床版などが代表的なものである。一方、混合構造は、異種材料からなる部材を組み合わせた構造システムで、栈橋がこの一例で

ある。

ハイブリッド構造の歴史は、20世紀初頭に考案されたコンクリート充填角鋼管柱にその起源を見ることができる。その後、逆に形鋼をコンクリート中に埋め込んだ形態の合成柱が出現した。これは、我が国で鉄骨鉄筋コンクリートとして独特の発展を遂げ、優れた耐震性のために高層建築物に良く採用されている。また、1950年代頃から鋼桁と鉄筋コンクリートとを合成した合成桁が開発された。合成桁は、経済性および騒音軽減の観点から特に大都市近郊の橋梁などに多くの実績を有している。さらに、図-1<sup>1)</sup>に示すように、鋼板と（鉄筋）コンクリートとを合成した合成床版が開発された。これは、鋼板とコンクリートとをずれ止めで合成したものである。この形式のハイブリッド構造は耐荷力、経済性および軽量化に有利となることが多く、また適用範囲も広い。港湾・海洋構造物に活用するに際しても、有望な構造様式であると言える。本報告では、この種のハイブリッド構造を対象とする。

## 2.2 ハイブリッド構造の力学

鉄筋コンクリートと鋼板とによるハイブリッド構造の概要を図-2に示す。港湾・海洋構造物では、鋼板を片側に配置したオープンサンドイッチ構造と鋼板を両側に配置したオープンサンドイッチ構造と鋼板を両側に配

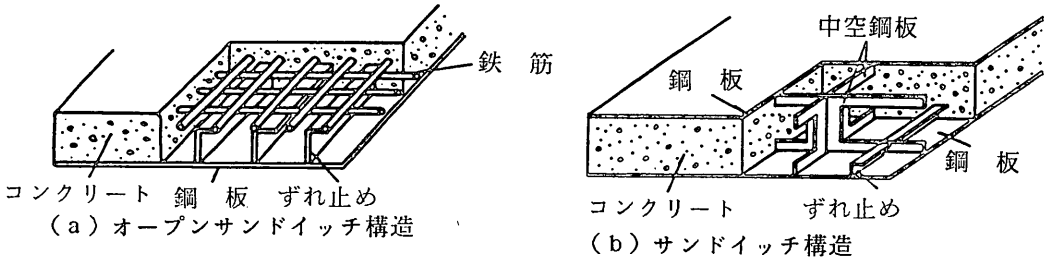


図-2 港湾・海洋構造物でのハイブリッド構造の概要

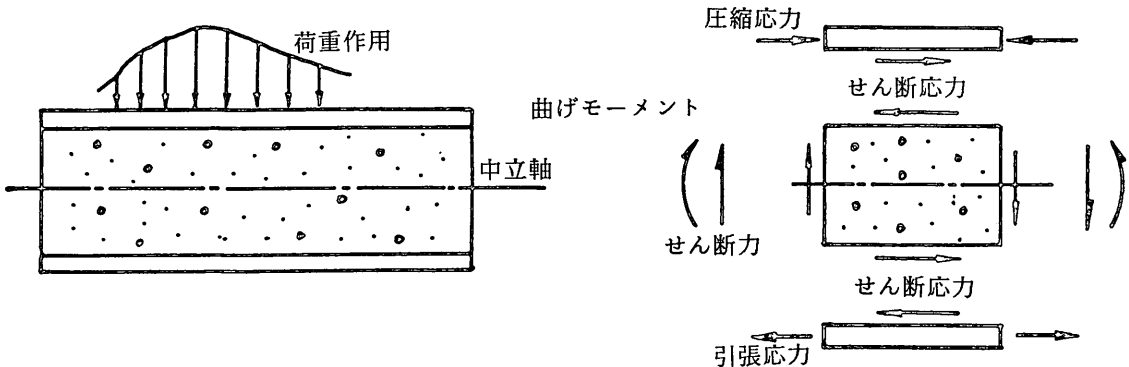
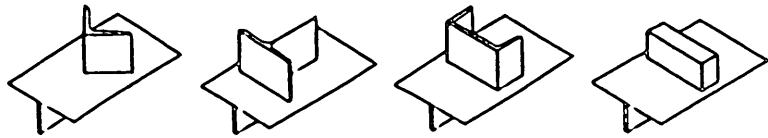


図-3 ハイブリッド構造の耐荷メカニズム

曲げおよびせん断を受けるハイブリッドはりの耐力特性



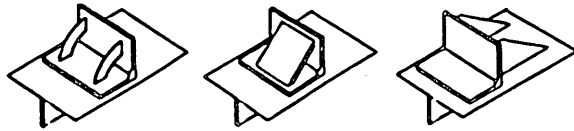
アングル

テー

チャンネル

ブロック

(a) 補剛なし



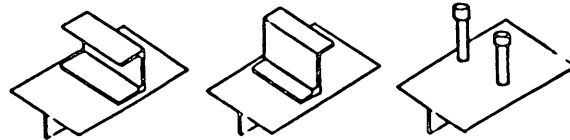
アングル (補剛有り)

アングル (補剛有り)

アングル (補剛有り)

(b) 補剛あり

剛なずれ止めの種類

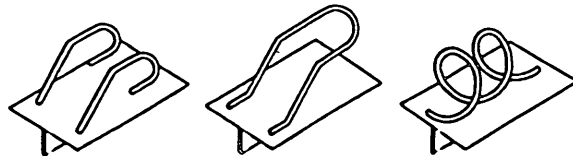


チャンネル

ゼット

スタッド

柔なずれ止めの種類

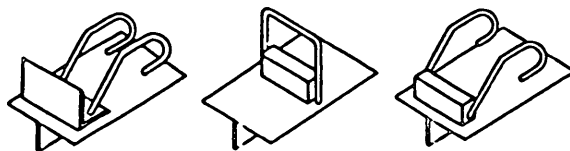


フック筋

ループ筋

スパイラル筋

付着形ずれ止め (合成鉄筋) の種類



アングルとフック筋

ブロックとフック筋

ブロックとループ筋

剛なずれ止めと輪形筋と併用したずれ止めの種類

図-4 ずれ止めの構造



置したサンドイッチ構造の2種類の形態がある。これらの構造では図-3に示すように、断面に生じる引張力に対しては鋼板で、圧縮力に対してはコンクリートおよび鋼板でそれぞれ抵抗する。力学的には、圧縮力をコンクリートで、引張力を鉄筋で負担する鉄筋コンクリートと同じである。

この抵抗メカニズムを発揮させるためには、鋼板とコンクリートとを何らかの方法で確実に一体化させる必要がある。鋼板とコンクリートとの間には、粘着作用や摩擦作用による自然の付着力が働く。しかし、これらの作用による付着力は非常に小さいので、ハイブリッド構造では、図-4に示すようなずれ止めを両者の一体化のために用いる。これまでの実績では、ずれ止めにはスタッドジベルが用いられることが多い。スタッドジベルはボルトに類似したもので、頭部にはナットあるいは突起が設けられている。これを母材である鋼板に溶接する。このスタッドジベル自体のせん断強度や周囲のコンクリートの強度で、部材に作用するせん断力や引抜き力に抵抗する。

スタッドジベル以外にも各種のずれ止めが考案され、実際に用いられている。港湾構造物では、著者が山形鋼などの形鋼を用いてずれ止めとすることを提案している。形鋼を用いることにより鋼板の剛性を増加させ、コンクリート打設などの施工中の型枠・支保工を低減させることを目的としている。

### 2.3 ハイブリッド構造の設計

我が国においては、ハイブリッド構造に対する統一的な設計法は、十分に確立されていると言えない状況にある。道路橋、鉄道橋、建築物などでは、それぞれ個々に設計指針<sup>2),3),4)</sup>が示されている。港湾施設では、これまでハイブリッド構造が用いられなかったこともあり、明文化された設計基準はない。これらのことから、土木学会では平成元年に「鋼・コンクリート合成構造の設計ガイドライン」<sup>1)</sup>を出版し、ハイブリッド構造の設計・施工に関する一般的な考え方を整理した。

ハイブリッド港湾・海洋構造物の設計では、基本的には、ずれ止めの耐力、曲げ耐力、せん断耐力、波浪に対する疲労、ひびわれと鋼材の腐食および接合部(隅角部)の構造細目に関して検討が行われる。

ずれ止めの設計では、鋼板とコンクリート間に作用するせん断力を算定し、それに対して必要なずれ止めの抵抗面積や配置間隔を設定する。形鋼をずれ止めに採用した場合のずれ止めの破壊の状況および破壊耐力については、既に明らかにされている<sup>5)</sup>。

ハイブリッド構造の曲げおよびせん断挙動は複雑であ

る。すなわち、鋼板とコンクリートとが合成された断面において、鋼とコンクリートとが一体となって平面保持の仮定が成立するような、完全合成機構を形成する場合がある。一方、両者が単に重ね合わされただけで、それぞれ独自の中立軸を持つ重ねばり的な機構(あるいは累加機構とも呼ぶ)を形成する場合もある。現実のハイブリッド構造では、ずれ止めの性状、鋼あるいはコンクリートのせん断剛性とせん断強さなどの程度に応じてこれらの中間の機構が存在する。このように合成の程度によって設計手法を変える必要があるので、種々の設計概念が存在し得る。しかし、ハイブリッド構造の場合には、合成の程度が種々の限界状態に応じて異なることが多いので、限界状態設計法が最も適切であると考えられる<sup>6)</sup>。本報告においても、これらと同様の観点から、載荷試験結果に基づいて、各限界状態に応じたハイブリッドはりの設計手法を検討するものである<sup>7)</sup>。

同時に、ハイブリッド構造では、鋼板にずれ止めやせん断補強鋼材を多数溶接することから、疲労限界状態に対する検討が必要である。疲労試験の結果では、既報<sup>7)</sup>のように従来の鉄筋コンクリートに比べて疲労強度がかなり低下する傾向にある。疲労破壊では鋼板の破断が生じるので、極力避けなければならない。ただし、我が国近海での波浪条件では、50年間の波浪作用に対して疲労破壊に対する一応の安全性は確認されている<sup>7)</sup>。

ハイブリッド構造の接合部あるいは構造全体系での力学特性の解明や設計法の検証などに関しては、ほとんど報告もされておらず、いくつかの検討課題を残している。この内、ハイブリッド構造物でのL形接合部(隅角部)あるいはT形接合部の力学特性については、載荷試験による検討を行っており<sup>8),9)</sup>、これらの詳細については今後報告する予定である。

### 2.4 海洋環境下でのハイブリッド構造の特徴

図-2に示すオープンサンドイッチ構造とサンドイッチ構造を用いて作られる海洋環境下のハイブリッド構造物には、以下に示す長所がある。

- ① 鉄筋コンクリート部材と比較して、部材厚さが薄くても所定の耐力やじん性が得られる。このことは、フーチングの長大化など部材の形状に大きな自由度をもたせることができる。同時に、部材の重量が軽くなるので、浮体構造や軟弱地盤上に設置される構造に有利となる。
- ② コンクリートにひびわれが発生しても、鋼板によって水密性が確保できる。このことは、浮体構造物、沈埋トンネルなどの止水を必要とする施設で有利となる。

③ 施工の際、配筋、型枠・支保工などを削減できる。また、工場製作が可能で、プレハブ化も容易となる。

④ 構造物そのものは多くの鋼材加工を必要とし、必ずしも経済的にならないが、全体として安価に建設される場合が多い。

一方、これまで港湾構造物にハイブリッド構造が用いられなかった理由として、以下の2点が挙げられる。

① 海洋環境下で鋼材を直接用いる場合の鋼材の劣化の程度が十分把握されておらず、長期の耐久性に不安感がある。

② ハイブリッド構造の設計・施工法が整備されておらず、構造様式の特徴や特殊性を十分に生かした設計ができない。

一般に、ハイブリッド構造では、鋼板とコンクリートとの付着が悪く、通常の鉄筋コンクリート構造と比べて表面ひびわれ幅が大きくなる傾向がある。すなわち、鉄筋コンクリートと比べて鋼材の腐食に対して不利となることもあると考えられ、よりきめの細かい検討をする必要がある。

オープンサンドイッチ構造では、鋼板を構造物の内側に位置させれば、外部との間で空気や水の出入りがない状況であるので、腐食に対する特別な配慮は不要と考え

られる。したがって、この反対側である常時海水の作用する側に位置するコンクリートのかぶり厚さ、ひびわれ幅などに配慮すれば、耐久性を十分確保できるものと思われる。一方、サンドイッチ構造では、鋼板が海水の作用に直接さらされるので、飛沫域などの腐食環境の厳しい箇所に用いる場合には、防食対策などが必要である。ただし、常時海水中や海底内地盤にある場合には腐食量もかなり小さいので、電気防食を施すこと等により海洋環境下での使用が十分可能である。ハイブリッド構造の海洋環境下での劣化の状況については、別途研究が実施されている<sup>10)</sup>。

### 2.5 海洋構造物への適用例

海洋環境下ではこれまで、鉄筋コンクリートあるいは鋼材のみで構造物の建設が十分可能であった。しかし、構造物の多様化やより厳しい条件下での建設の要請などから、優れた力学特性を有し、かつ低価格の構造物を建設する必要性が高まりつつある。この解決策の1つとして、ハイブリッド構造が注目されてきた。

我が国において、海洋構造物に本格的にハイブリッド構造を採用した最初の例は、北極海向けの石油掘削プラットフォーム Super CIDS<sup>11)</sup> である。この施設では、海底部と空中部は鋼構造、両者の中間部がプレストレストコンクリート構造、という混合構造であった。北極海

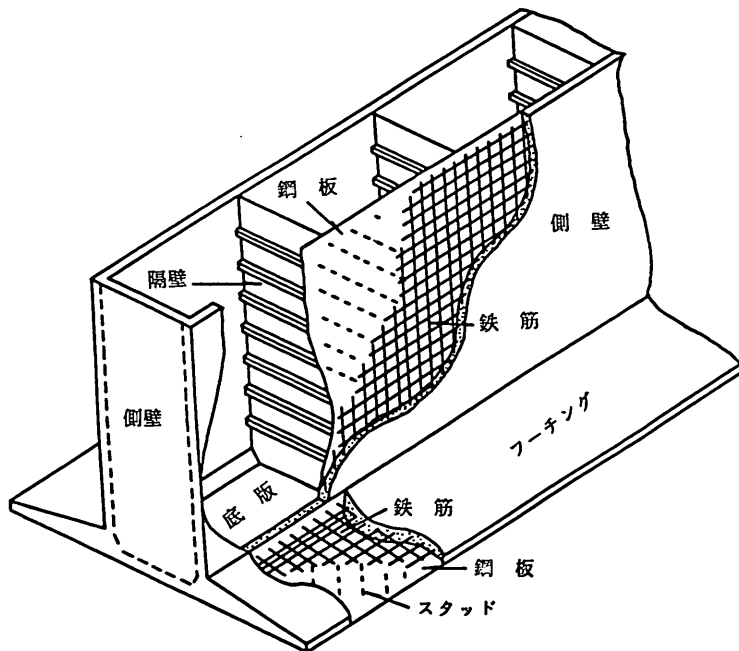


図-5 ハイブリッド構造による防波堤ケーソン

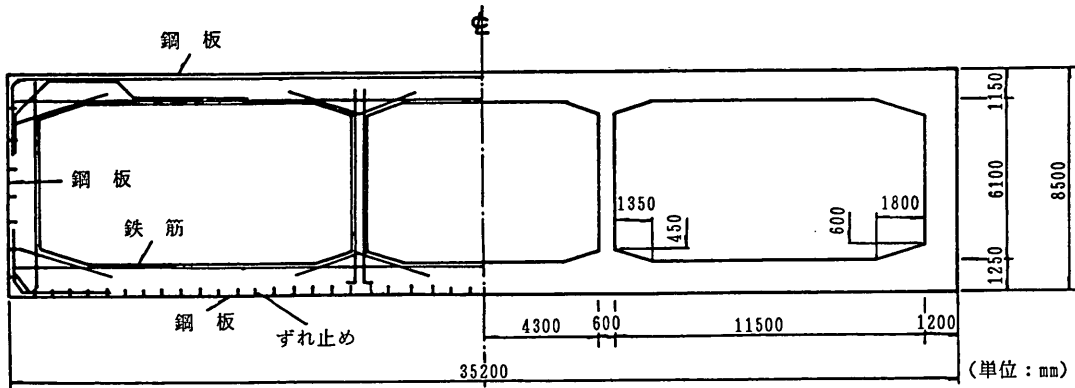


図-6 ハイブリッド構造による沈埋トンネル(案)

での石油掘削施設では、氷海域での衝撃荷重に対する有利性、止水性などの観点からサンドイッチ構造が注目されている<sup>12)</sup>。

港湾構造物では、防波堤、浮き防波堤、沈埋トンネルなどへの利用が検討あるいは進められている。防波堤ケーソンでは、ハイブリッド構造での力学特性の向上の利点を生かして、図-5に示すように、フーチングが大きく張り出した構造を採用できた<sup>13)</sup>。従来のケーソンでは、フーチング部を台形にしたり、パットレスを設けるなどの工夫を行っていたが、ハイブリッド構造の採用により、これらを用いる必要がなかった。浮き防波堤では、ハイブリッド構造を最も利用している施設で<sup>14)</sup>、いずれも鋼板の止水効果を期待したものである。また、沈埋トンネルでは、従来止水・防水のみの目的で鋼板を外周に設けていたが、この鋼板を構造材としても活用することで、経済性を追求している。現在計画中の大阪南港沈埋トンネルでは、図-6に示すように、オープンサンドイッチ構造による沈埋トンネル函体の製作が計画されている。

### 3. 載荷試験

#### 3.1 試験体

載荷試験は、図-7に示す7種類(HS-1~HS-7)、合計14本のはり試験体を対象として行った。各々のはりの基本寸法は同一で、はり断面の幅が270mm、高さが250mmおよびはりの全長が3500mmである。これらの試験体の構造様式は、事前に行った予備載荷試験での検討結果<sup>15)</sup>を参考に決定した。また、既に報告しているハイブリッドはりの疲労試験<sup>7)</sup>においても、同じ形状・寸法の試験体を用いている。

HS-1~HS-5の5種類のはりは、板厚6mmの鋼板を引張縁に配置したオープンサンドイッチ構造である。ずれ止めには、辺長50mm、肉厚6mmの山形鋼を用い(HS-4を除く)、300mm間隔で鋼板にすみ肉溶接した。その際、溶接後の残留ひずみを極力低減する目的で、図-8に示すように1箇所当たりの溶接長を約40mmとし、ほぼ等間隔で5箇所に溶接を施した。また、溶接の脚長は6mm程度とし、溶接部に十分な強度を確保した。圧縮鉄筋として、D19鉄筋2本をはりの上縁より50mm下方の位置に配筋した。

これらのはりのせん断補強には、それぞれ異なる方法を採用した。HS-1ではD16鉄筋をスターラップ状に加工して、鋼板に約50mmの長さをすみ肉溶接した。HS-2ではHS-1と同様なせん断補強法であるが、補強鉄筋をずれ止めのフランジに溶接した(図-8を参照)。HS-3では、D16鉄筋をJ形に加工して鋼板にコーン状の溶接を施した。HS-4では、ずれ止めのウェブ部分を上方に伸ばし、せん断補強とずれ止めとを兼用する構造とした。この際、板厚6mmの鋼板を、D16鉄筋の有効せん断抵抗面積と等しくなるように中空加工して用いた。HS-5は、D16鉄筋を斜めに配筋してせん断補強とした。この際、鉄筋を鋼板にすみ肉溶接で固定した。これらのせん断補強鋼材の配置間隔は300mmで、ずれ止めの位置(HS-2およびHS-4)、あるいはずれ止めとずれ止めの中央の位置(HS-1, HS-3, HS-5)に配置した。

HS-6およびHS-7の2種類のはりは、はりの引張縁および圧縮縁の両縁に鋼板を配置したサンドイッチ構造であり、鉄筋は用いていない。HS-6は、HS-4と同様の考え方でせん断補強とずれ止めとを兼用し、中空鋼板を300mmの間隔で両縁の鋼板にすみ肉溶接した。HS-7

曲げおよびせん断を受けるハイブリッドはり耐力特性

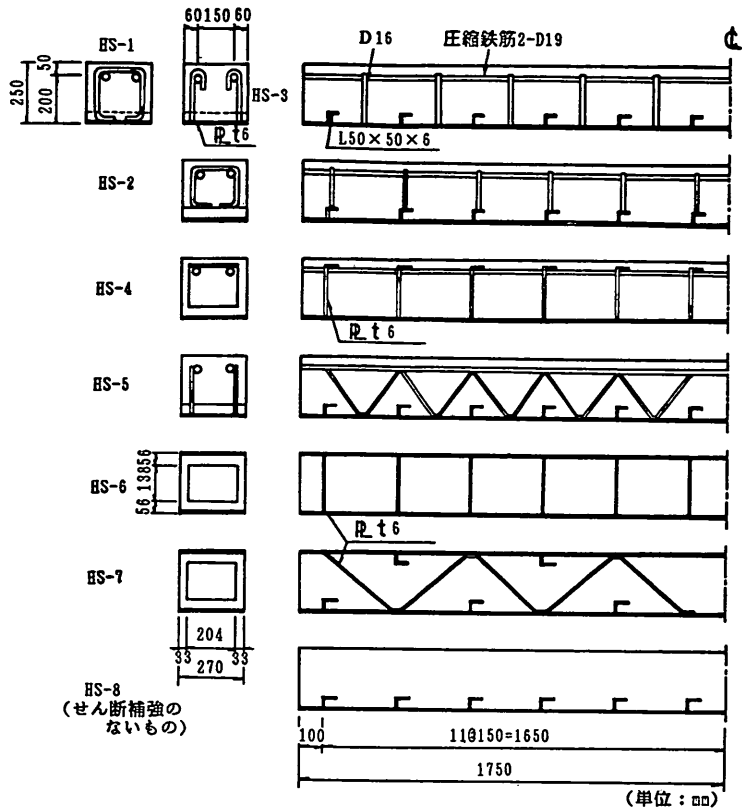


図-7 はり試験体の構造

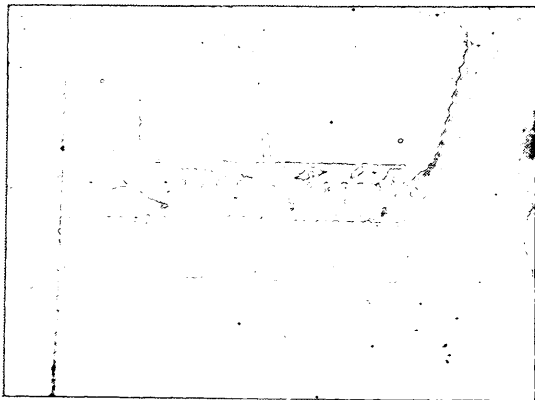


図-8 ずれ止めの溶接の状況

では、中空鋼板を斜めに配置してせん断補強とずれ止めを兼用する構造とするとともに、さらに中空鋼板と引張あるいは圧縮鋼板との溶接位置の中央に山形鋼をずれ止

めとして配置した。

3.2 材料の特性

試験体製作に用いた鋼材は、鋼板およびせん断補強用の中空鋼板が S S 41-t6, 山形鋼が S S 41-L50×50×6, 圧縮鉄筋が S D30-D19, およびせん断補強筋が S D30-D16である。これらの鋼材の機械的性質を表-1に示す。

コンクリート製作に用いたセメントは早強ポルトランドセメントで、その試験成績を表-2に示す。骨材には、東京都八王子産の砕砂と碎石を用い、最大寸法は10mmである。骨材の試験成績を表-3に、粒度分布を図-9に示す。

コンクリートの配合は、設計基準強度が 350kgf/cm<sup>2</sup>, スランプが 8 ± 2.5cm, 空気量が 5 ± 1% を満足するように決定した。コンクリートの示方配合は表-4に示すように、水セメント比が 58%, 細骨材率が 52% である。

荷重試験時のコンクリートの圧縮および曲げ強度は、試験体製作に用いたコンクリートを用いて別途製作して

表-1 使用鋼材の機械的性質

種 類	規格・寸法 (mm)	降伏強度 (kgf/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (kgf/mm <sup>2</sup> )	伸 び (%)
鋼 板	S S 41 t=6	39	48	27
ずれ止め	S S 41 L50×50×6	32	46	27
鉄 筋	S D 30 D19	39	57	21
鉄 筋	S D 30 D16	38	55	22

表-2 セメントの試験成績

比 重	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	凝 結			安定性	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	強 減 (%)	熱 量 (%)	塩 素 (%)	圧 縮 強 度 (kgf/cm <sup>2</sup> )			
		水 量 (%)	始 発 (h-m)	終 結 (h-m)							1 日	3 日	7 日	28 日
3.13	4250	29.6	2-16	3-16	良	1.5	2.7	1.0	0.004		144	261	362	466

表-3 骨材の試験成績

験 試 項 目	細 骨 材	粗 骨 材
比 重	2.62	2.67
吸 水 量 (%)	1.67	0.43
粗 粒 率	3.01	5.98
単位容積重量 (kg/m <sup>3</sup> )	1740	1580
実 績 率 (%)	66.7	58.3
洗 い 験 試 (%)	3.9	0.2
粘 土 塊 量 (%)	0.4	0.1

おいた供試体により、それぞれ関連する JIS にしたがって求めた。圧縮試験用供試体は φ100×200mm 円柱、曲げ試験用供試体は、100×100×400mm 角柱である。その結果、コンクリートの圧縮強度および曲げ強度はそれぞれ、267~287kgf/cm<sup>2</sup> および 43.3~47.6 kgf/cm<sup>2</sup> であった。

試験体の製作に当たっては、鋼材に発生したさび、よごれなどを除去したのち、溶接などにより鋼材の組立てを行った。ハイブリッドはりでは、上縁からコンクリートを打設した場合、ずれ止めのフランジの下部などの箇所にはブリージング水がたまり、合成が十分になされない恐れがある。今回はこれを極力避けるために、はりの側

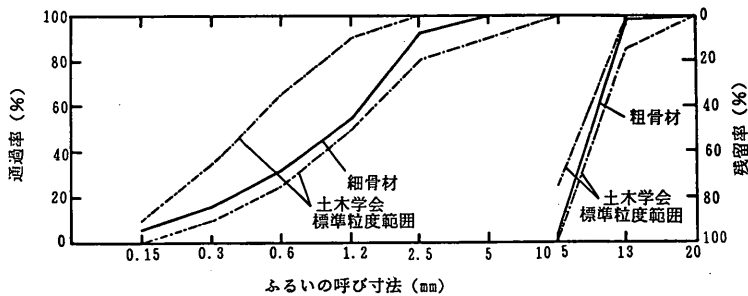


図-9 骨材の粒度分布

曲げおよびせん断を受けるハイブリッドはりの耐力特性

表-4 コンクリートの示方配合

設計基準強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	粗骨材 最大寸法 (mm)	スランブ の範囲 (cm)	空気 量 の範囲 (%)	水・セメ ント比	細骨材率	単 位 量 (kgf/m <sup>3</sup> )					
						水	セメント	細骨材	粗骨材	減水剤	A E 剤
350	10	8±2.5	5±1	0.58	0.52	165	284	946	890	6.42	1.14

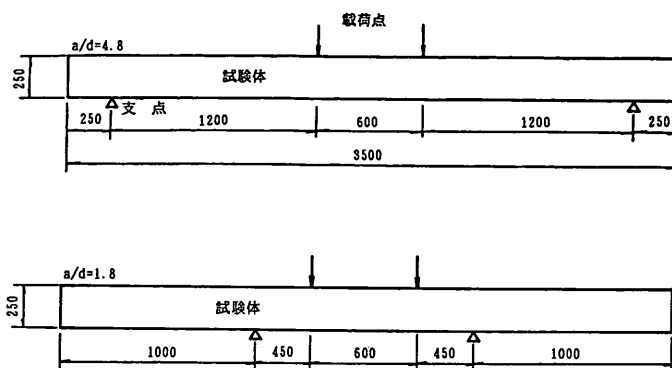


図-10 荷重の方法

面方向からコンクリート打設を行った。コンクリート打設の際は、棒状バイブレータを用いて十分に締固めを行った。コンクリート打設後2～3日で脱型し、以後室内で試験時まで気中養生を行った。

3.3 試験方法と計測方法

荷重試験は、図-10に示すように、スパン長が3000mmとなるようにはりを2点で単純支持して行った。荷重位置は、曲げ荷重では  $a/d = 4.8$ 、せん断荷重では  $a/d = 1.8$  と設定した。ここで、 $a$  はせん断スパン長、 $d$  ははりの有効高さであり、 $a$  と  $d$  との比をせん断スパン比と呼ぶ。鉄筋コンクリートはりの荷重試験結果によると、今回採用したせん断スパン比では、それぞれ目標とする破壊形態が一般的に卓越するとされている<sup>16)</sup>。荷重の状況を図-11にもあわせて示す。

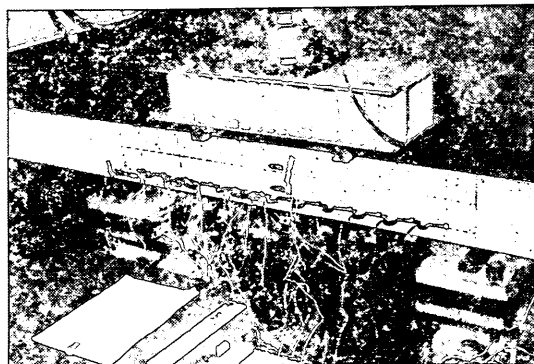


図-11 荷重試験の状況

荷重試験では、静的な単調増加荷重をはりに作用させた。この際、荷重ステップは、曲げ荷重で約 0.5 tf、せん断荷重で約 1.0 tf とした。各荷重ステップでは、はりのたわみ、鋼板、ずれ止めと鉄筋のひずみおよびひびわれ幅を計測するとともにひびわれ発生状況の観察も行った。 $a/d = 4.8$  での HS-1 および HS-6 での計測位置の詳細をそれぞれ図-12および図-13に示す。他のはりでもほとんど同様の位置で計測を実施した。

これらの計測では、以下の計測機器を使用した。はりのたわみは、容量50mmの変位計で計測した。ひずみの計測は、コンクリート用が測定長さ30mm、鋼材用が測定長さ6mmの電気抵抗線式ひずみゲージを用いた。ひびわれ幅の計測は、標点間隔100mmのバイ型変位計を使用して行った。ひびわれ発生状況は、目視により観察し、試験終了後に記録紙にスケッチした。

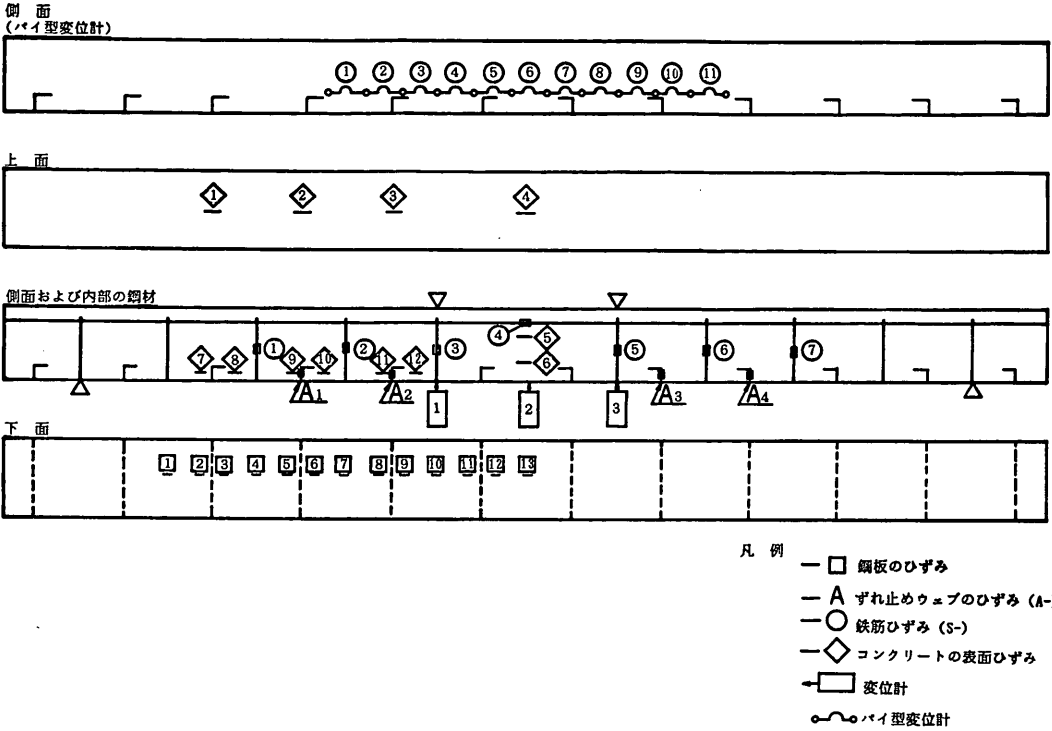


図-12 計測位置 (HS-1)

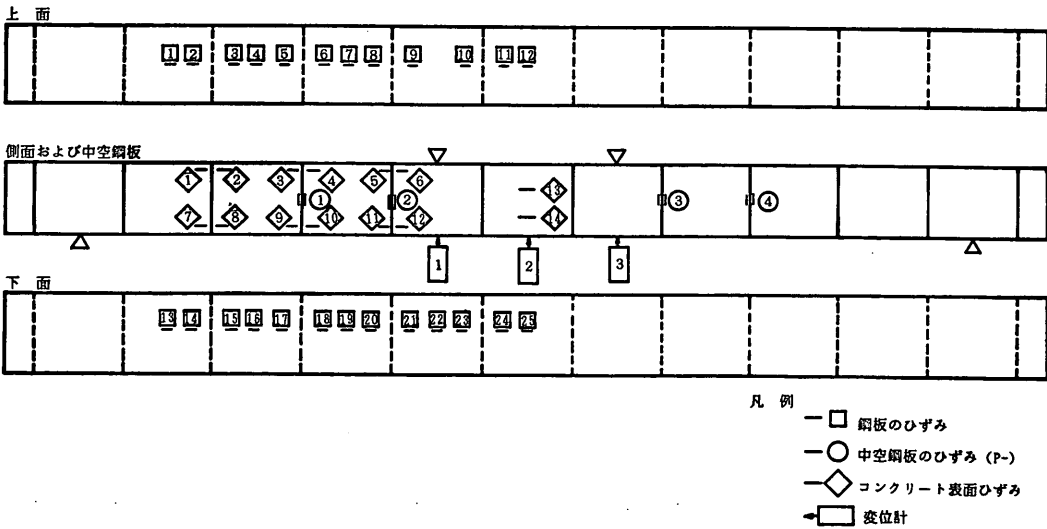


図-13 計測位置 (HS-6)

表-5 コンクリート強度

	$a/d$	$P_{max}$ (tf)	$\delta_u$ (mm)	$P_{cr}$ (tf)	$P_{\delta u}$ (tf)	破壊の形態
HS-1	4.8	20.5	31.6	—	—	曲げ破壊
HS-2	4.8	18.0	21.5	—	—	曲げ破壊
HS-3	4.8	20.8	31.6	—	—	曲げ破壊
HS-4	4.8	21.0	23.4	—	—	曲げ破壊
HS-5	4.8	20.9	26.8	—	—	曲げ破壊
HS-6	4.8	21.7	19.1	—	21.7	曲げ破壊
HS-7	4.8	20.9	21.5	—	13.0	曲げ破壊
HS-8	4.8	13.7	—	—	—	せん断破壊
HS-9	4.8	11.8	—	—	—	せん断破壊
HS-1	1.8	54.1	10.7	47.0	—	せん断破壊
HS-2	1.8	52.0	10.5	52.0	—	せん断破壊
HS-3	1.8	59.8	15.6	52.0	—	せん断破壊
HS-4	1.8	56.2	11.0	56.0	—	せん断破壊
HS-5	1.8	54.9	8.8	43.3	—	せん断破壊
HS-6	1.8	62.5	12.6	—	61.9	曲げ破壊
HS-7	1.8	57.0	11.0	48.0	19.0	曲げ、せん断破壊

$P_{max}$ : 最大荷重,  $\delta_u$ : 最大荷重時のスパン中央でのたわみ  
 $P_{cr}$ : 斜めひびわれ発生荷重,  $P_{\delta u}$ : 圧縮側鋼板座屈荷重

#### 4. 載荷試験の結果と考察

各載荷試験で得られた終局荷重, 破壊の形態などの試験結果を表-5に示す。ここで, HS-8およびHS-9は, せん断補強を全く施さなかったオープンサンドイッチはりおよびサンドイッチはりのそれぞれの載荷試験結果である。これは, 今回の試験を実施する前に予備的に検討を行った際の試験結果<sup>13)</sup>を, 本試験でのはり試験体寸法に補正した値である。

##### 4.1 ひびわれおよび破壊の状況

各はりの終局時におけるひびわれ発生状況を図-14に示す。いずれのはりでもずれ止めの位置から最初にひびわれが発生した。

$a/d=4.8$ の曲げ載荷の場合では, ほとんどすべてのずれ止めの位置からひびわれが発生した後, 一部のはりでは, 引張側鋼板が降伏してから, さらにずれ止めの中間のせん断補強鋼材を溶接してある位置付近からも曲げひびわれが発生した。せん断スパン内に発生したひびわ

れは, 荷重の増加につれて斜めひびわれとなったが, HS-1~HS-7のせん断補強を行ったはりでは, いずれも斜めひびわれが貫通せず, コンクリートの曲げ圧縮破壊ではりの終局に至った。しかし, せん断補強のないはり(HS-8およびHS-9)では, 斜めひびわれが貫通して, はりがせん断破壊する現象が認められた。また, ハイブリッドはりでは, 通常の鉄筋コンクリートのはりで見られる斜め引張破壊の形態と若干異なり, 載荷点とずれ止めあるいは上下縁のずれ止めを結ぶ斜めひびわれが卓越した。このことから, 今回提案したせん断補強法は, いずれも効果が高いことがわかった。また, はりの終局荷重はHS-2が若干低くなったが, 他のはりではほとんど同じ値となった。すなわち, 圧縮側の鋼板の配置は, 鋼材比が増加するにもかかわらず, ほとんど耐力の上昇に寄与しなかった。さらにHS-2では, ずれ止めに直接せん断補強筋を溶接したので, ずれ止めフランジの曲げ変形が拘束されたために耐力が若干低下したものと考えられる。

$a/d=1.8$ のせん断載荷の場合では, ほとんどの供試体で斜めひびわれが貫通した。斜めひびわれは, 載荷点と支点(支点の位置にずれ止めがある)を結ぶように発生した。また, HS-1~HS-5のオープンサンドイッチはりでは, コンクリートの圧縮縁から下方に向かってひびわれが進展し, 斜めひびわれ発生後, 典型的な曲げせん断破壊の破壊形態を示した。終局荷重は, HS-6が最も大きく62.5 tfとなり, HS-2が若干低くなったが, 他のはりではほとんど同程度の値を示した。

圧縮縁にも鋼板を配置したはり(HS-6およびHS-7)では, 圧縮鋼板がはりの外側へ座屈する現象が見られた。 $a/d=4.8$ の場合, HS-6では21.7 tfで, HS-7で, HS-7では13.0 tfで座屈現象が顕著に現れた。HS-6での座屈の状況を図-15に示す。また,  $a/d=1.8$ の場合には, HS-6では61.9 tfで, HS-7では19.0 tfで座屈が顕著となった。いずれのせん断スパン比でも, HS-6では鋼板の座屈とはほぼ同時に終局に至ったが, HS-7では鋼板が座屈してもはりは十分の強度を保持していた。

##### 4.2 はりのたわみ

$a/d=4.8$ (曲げ載荷)および $a/d=1.8$ (せん断載荷)での荷重とはりスパン中央でのたわみ量との関係をそれぞれ図-16および図-17に示す。

図-16に示す $a/d=4.8$ (曲げ載荷)では, いずれのはりでも最大荷重に達した後たわみが進行し, 荷重-たわみ曲線に明瞭なピークが観察されなかった。また前述のように, HS-6およびHS-7では, 圧縮側鋼板の座



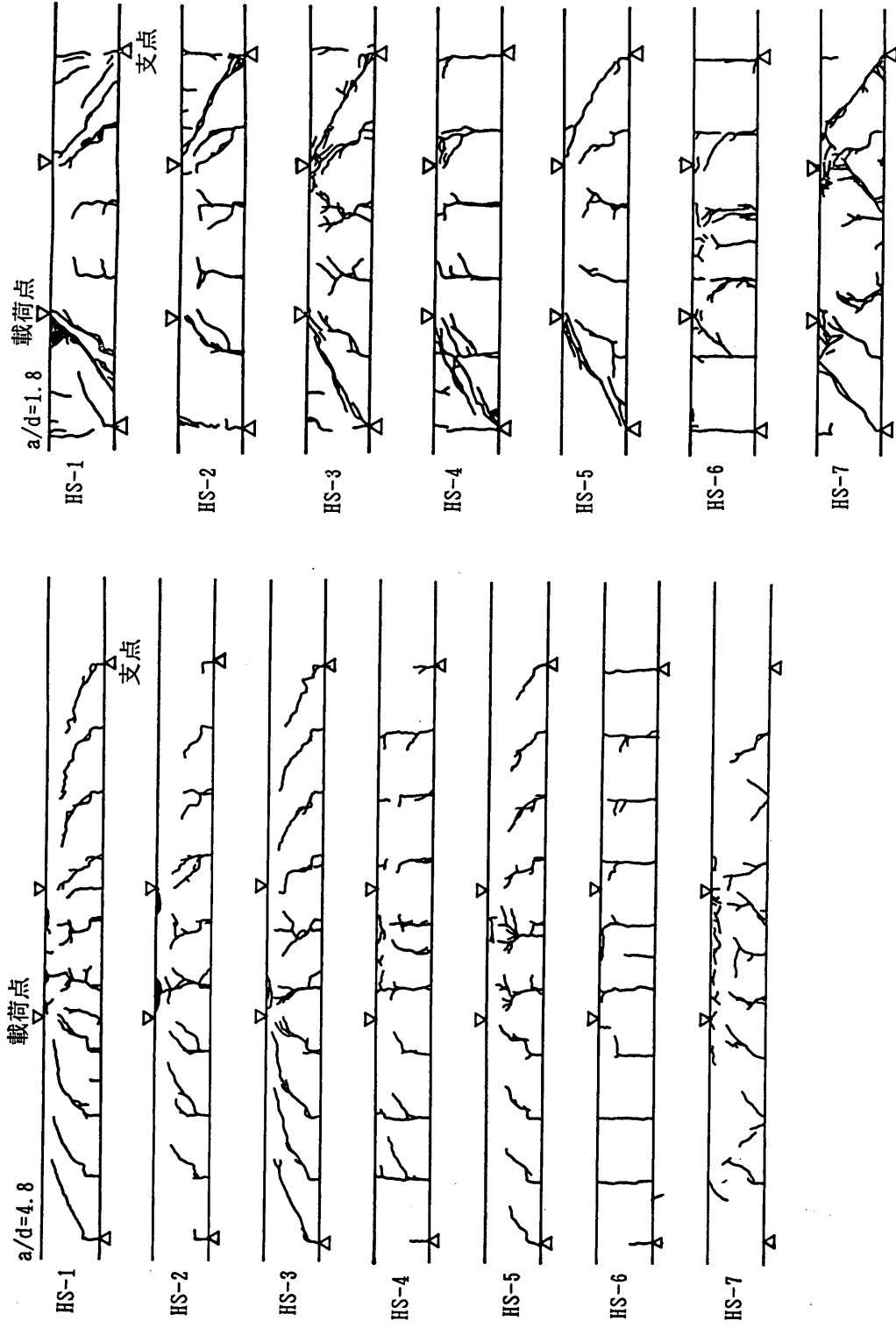


図-14 ひびわれの発生状況

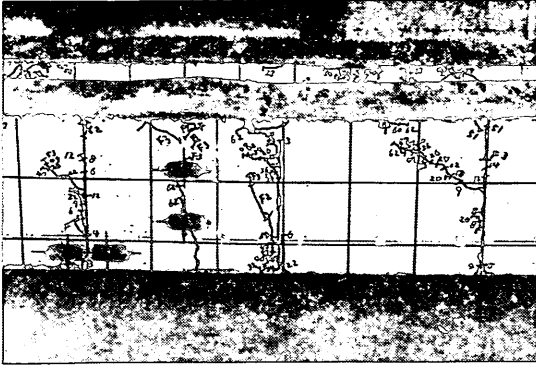


図-15 圧縮鋼板の座屈の状況 (HS-6)

屈が生じたが、座屈後も急速に耐力が低下することはなく、荷重に抵抗できた。したがって、せん断補強を十分に施せば、曲げ圧縮破壊を卓越させることができるとともに十分なじん性が得られることが実証できた。

図-17に示す  $a/d=1.8$  (せん断載荷) の場合、ほとんどのはりでは最大荷重に達した後急速に耐力が低下したが、HS-6では、最大荷重到達後もしばらく耐力を保持した。これは、HS-6ではせん断破壊よりも曲げ破壊が卓越したためであり、せん断スパン比の小さい場合に、サンドイッチ構造の若干の有効性が認められた。

両試験ケースとも初期剛性は各はり間でそれぞれほとんど同程度であったが、HS-2は他と比べて同一荷重に対するたわみ量が大きかった。これは、HS-2以外のはりではずれ止め間にせん断補強鋼材が配置されており、このせん断補強鋼材がずれ止めの効果を若干有しているためである。

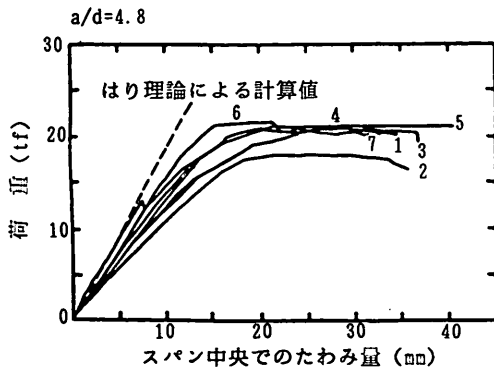


図-16 荷重とスパン中央でのたわみ量との関係 ( $a/b=4.8$ )

単純ばりの理論<sup>17)</sup>から求めたたわみの計算結果を図-16に示すが、試験結果は計算値よりも若干大きなたわみとなった。この傾向は、従来の鉄筋コンクリートのものとほとんど同様である。

### 4.3 鋼材に生じたひずみ

#### (1) 引張鋼板のひずみ

図-18および図-19に引張鋼板における各荷重段階でのひずみ分布を示す。いずれのはりでも引張鋼板に生じたひずみは降伏ひずみ (0.18%) を超えており、鋼板の降伏が認められた。

図-18に示す  $a/d=4.8$  (曲げ載荷) の場合には、曲げモーメント一定区間 (載荷点より内側) でのひずみはほぼ一定となった。せん断スパン内 (載荷点より外側) では、ずれ止め間でひずみが直線的に変化し、ずれ止め設置位置で鋼板のひずみが不連続となった。これらのことから、ハイブリッドはりの曲げ耐荷機構は、従来の鉄筋コンクリートはりの耐荷機構とほぼ同じであると考えられる。また、せん断スパン内では、コンクリートと鋼板間の力の伝達は、ずれ止めによってほとんど行われていたものと考えられる。

一方、図-19に示す  $a/d=1.8$  (せん断載荷) の場合には、斜めひびわれ発生前後で、引張鋼板には支点付近を除いてほぼ一定のひずみが計測された。また、曲げひびわれの発生位置 (ずれ止め設置位置) 近傍で若干の応力集中が見られた場合もあった。したがって、斜めひびわれ発生後のハイブリッドはりのせん断耐荷機構は、主にタイドアーチ機構によるものと考えられる。すなわち、引張鋼板にはほぼ一定の引張力が発生し、斜めひびわれに沿ったコンクリートの圧縮力と釣り合う現象が認

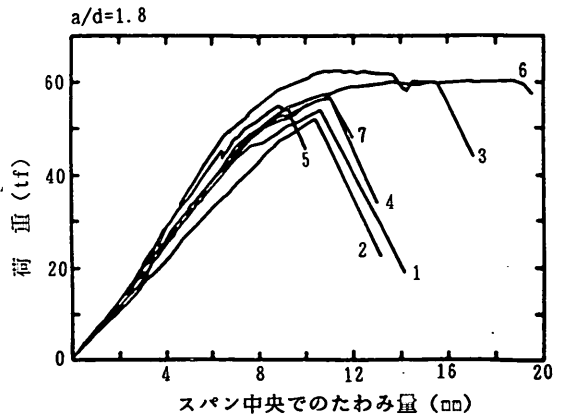


図-17 荷重とスパン中央でのたわみ量との関係 ( $a/d=1.8$ )

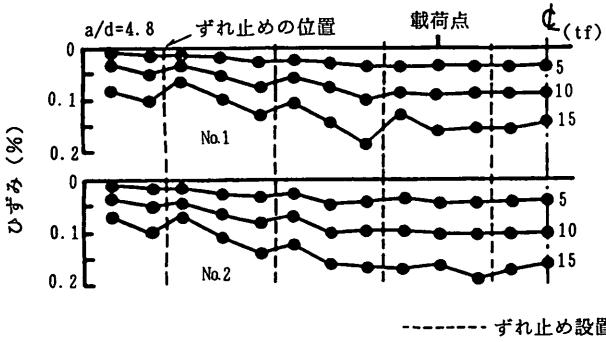


図-18 引張鋼板のひずみ分布 ( $a/d = 4.8$ )

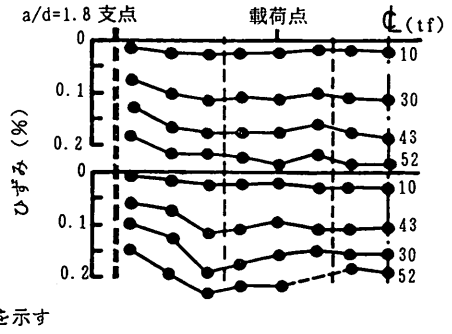


図-19 引張鋼板のひずみ分布 ( $a/d = 1.8$ )

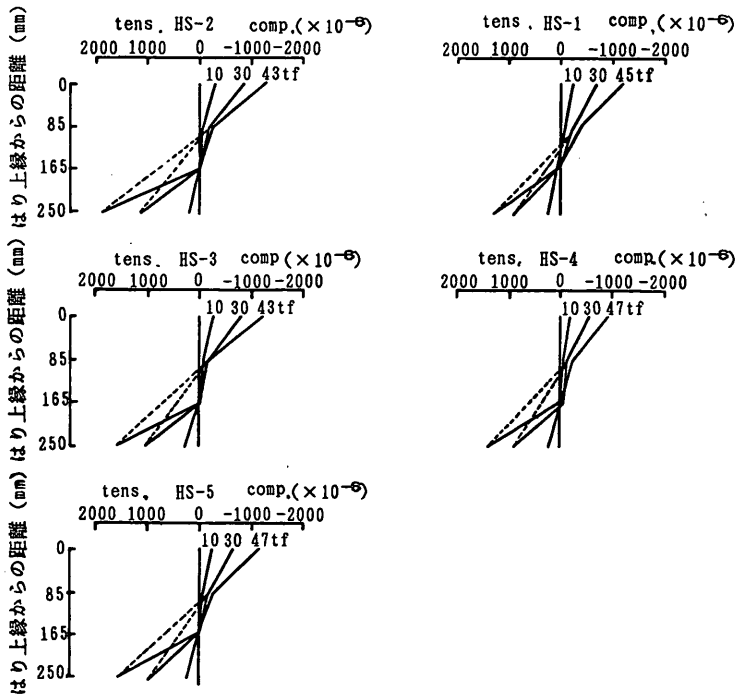


図-20 スパン中央断面内のひずみ分布 ( $a/d = 4.8$ )

められた。

鋼板のひずみ量の大きさを検討するため、はりスパン中央断面内の軸方向ひずみの分布を図-20および図-21に示す。荷重の小さい時期から終局に達するまで、軸方向ひずみはずれ止めの上端付近(はり上縁から180mm程度下方の位置)でほぼ0となる分布を示した。しかし、コンクリート圧縮縁、はり上縁から80mm付近のコンクリートおよび引張鋼板でのひずみ量の分布はほぼ直線的

であった。曲げモーメント一定区間での鋼板のひずみがほぼ一定となることと、コンクリート上縁の圧縮ひずみから引張鋼板にかけてのひずみの分布がほぼ直線的になることから、従来の鉄筋コンクリートを対象とした曲げ抵抗モーメントの算定式をハイブリッドはりの曲げ耐力の算定に適用することは可能であると考えられる。

(2) 圧縮鋼板のひずみ

HS-6およびHS-7での圧縮鋼板のひずみの分布を図

曲げおよびせん断を受けるハイブリッドはりの耐力特性

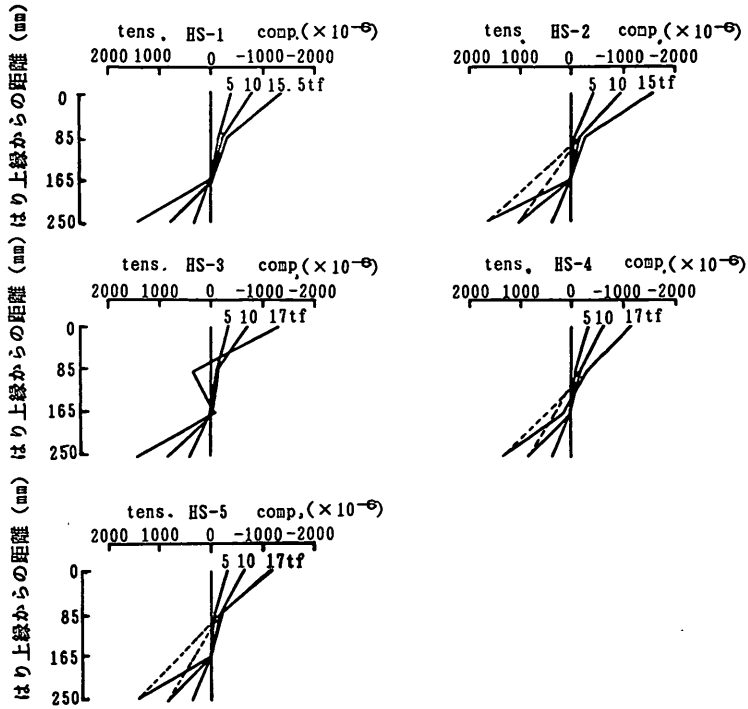


図-21 スパン中央断面内のひずみ分布 ( $a/d = 1.8$ )

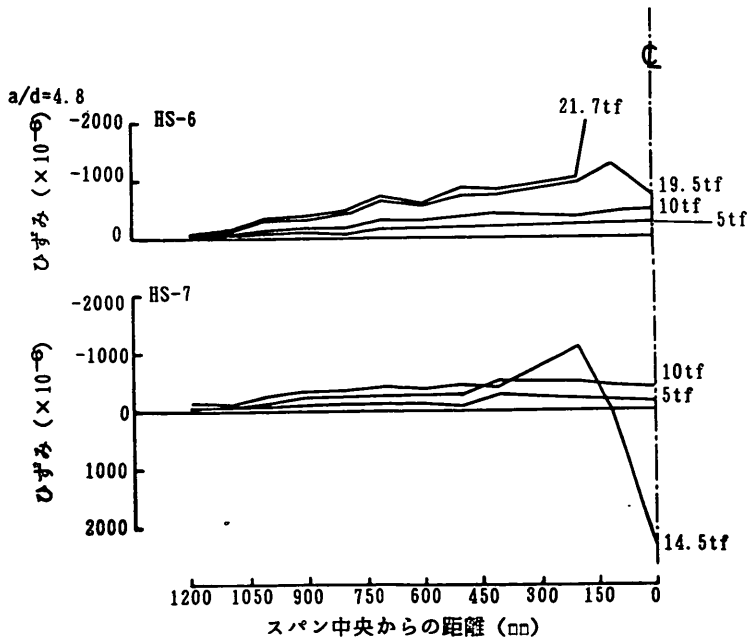


図-22 圧縮鋼板のひずみ分布 ( $a/d = 4.8$ )

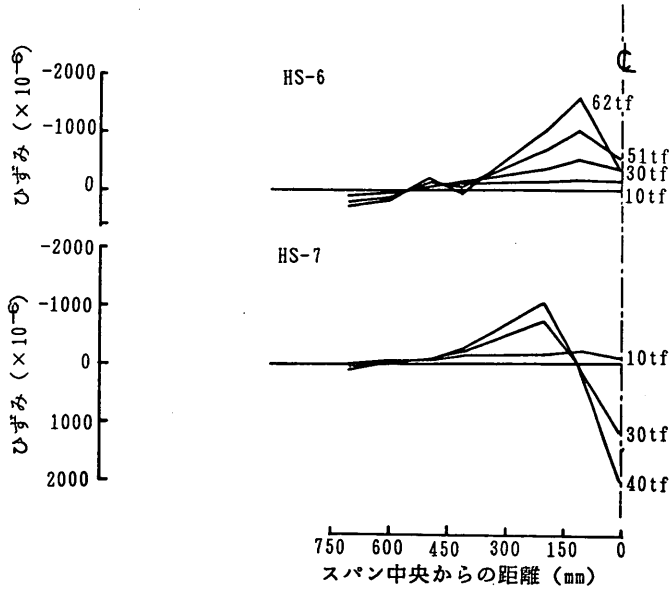


図-23 圧縮鋼板のひずみ分布 ( $a/d=1.8$ )

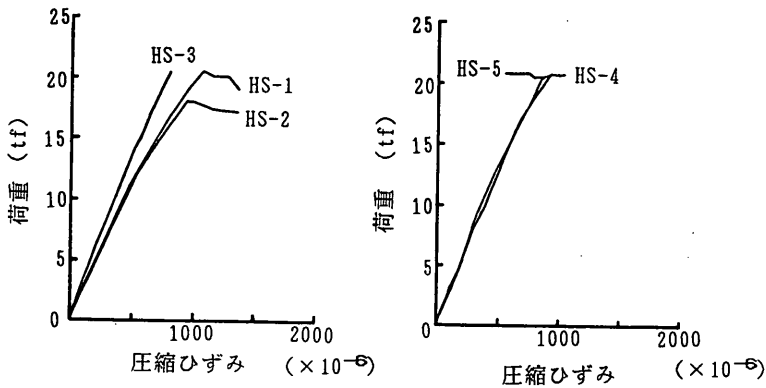


図-24 圧縮鉄筋のひずみの変化 ( $a/d=4.8$ )

および図-23に示す。荷重10tf程度までは、 $a/d=4.8$ では最大 $500 \times 10^{-6}$ の、 $a/d=1.8$ では最大 $200 \times 10^{-6}$ 程度の圧縮ひずみが発生した。最大ひずみは、スパン中央ではなく、ずれ止めの設置位置付近で生じた。これ以後、HS-6では荷重の増加に伴いひずみが増加したが、降伏には至らなかった。HS-7では、座屈現象が徐々に始まり、スパン中央付近では、ひずみが引張側に移行した。すなわち、座屈が生じると、圧縮鋼板ははりの耐力にほとんど寄与しない結果となった。

(3) 圧縮鉄筋のひずみ

圧縮鉄筋に生じたひずみ量と載荷荷重との関係を図-24および図-25に示す。いずれのはりでも最大荷重付近で約 $1000 \times 10^{-6}$ 程度の圧縮ひずみが発生した。 $a/d=4.8$ (曲げ載荷)では、HS-1およびHS-2で最大荷重到達後若干圧縮ひずみが増大する傾向が認められたが、降伏ひずみ(約 $1870 \times 10^{-6}$ )には至らなかった。

(4) ずれ止めのひずみ

図-26に $a/d=4.8$ でのHS-1およびHS-2の載荷点側のずれ止め(図-12のA2点)のウェブに発生したひずみ量を示す。ずれ止めのウェブのひずみは、絶対値が

曲げおよびせん断を受けるハイブリッドはりの耐力特性

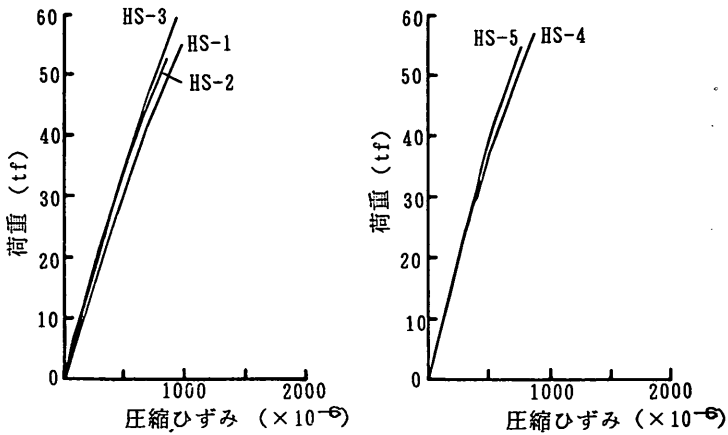


図-25 圧縮鉄筋のひずみの変化 ( $a/d = 1.8$ )

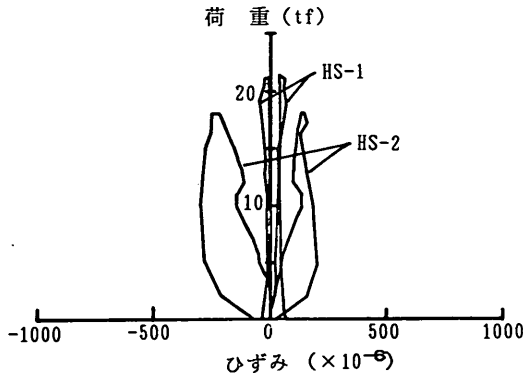


図-26 ずれ止めのひずみの変化

ほとんど同じで符号の異なるひずみの変化の状況を示した。つまり、曲げひずみが卓越した。また、HS-2でのひずみ量はHS-1に比べて大きく、ウェブの変形が進んでいたことを示している。これは、せん断補強筋をずれ止めに直接溶接したため、ずれ止めフランジの変形が拘束されたため、ウェブが片持ちばり的な挙動を示してひずみが増加したものと考えられる。このことは、表-5に示したように、終局耐力の低下につながった。

また、他のはりでもこれらのはりでの結果とほぼ同様の傾向を示した。

(5) せん断補強鋼材のひずみ

せん断補強鋼材に発生したひずみと荷重との関係を図-27および図-28に示す。

$a/d = 4.8$ の曲げ載荷場合には、せん断補強鋼材のひずみは荷重の増加とともにほぼ線形的に増加したが、い

ずれのはりでも最大ひずみは $1000 \times 10^{-6}$ 程度となり、降伏ひずみには至らなかった。

図-28に示す $a/d = 1.8$ のせん断載荷場合には、HS-3~HS-7では、終局時のひずみはほぼ降伏ひずみに達していた。また、HS-1、HS-3およびHS-6では、斜めひびわれが貫通した荷重以後、急激にひずみが増大する現象が特に顕著に見られた。したがって、ハイブリッドはりでは、コンクリートに斜めひびわれが発生し、タイドアーチ機構での斜めひびわれに沿ったコンクリートの圧縮応力がある値に達した後、せん断補強鋼材の応力が降伏応力度に達して、終局状態になる現象が認められた。すなわち、ハイブリッドはりのせん断耐力は、コンクリートアーチの耐力とせん断補強鋼材の引張耐力（降伏強度）の和で求められると考えられる。タイドアーチ機構の詳細は、5.3で述べる。

HS-7では、斜め方向にせん断補強鋼材が配置されているため、他のはりでの結果に比べて若干大きなひずみが発生していた。

4.4 ひびわれ幅

図-29に $a/d = 4.8$ の場合のHS-3でのひびわれ幅と載荷荷重との関係を示す。図中の数字は、図-12でのパイ型変位計の番号を示している。ひびわれ幅の測定は、ずれ止めのフランジ付近で行っているため、初期にはずれ止めとコンクリート間との剝離量が測定されている。⑨はせん断スパン内で計測されているので斜めひびわれのひびわれ幅が、⑩および⑪は、曲げモーメント一定区間での結果であるので、曲げひびわれのひびわれ幅が得られていると考えられる。

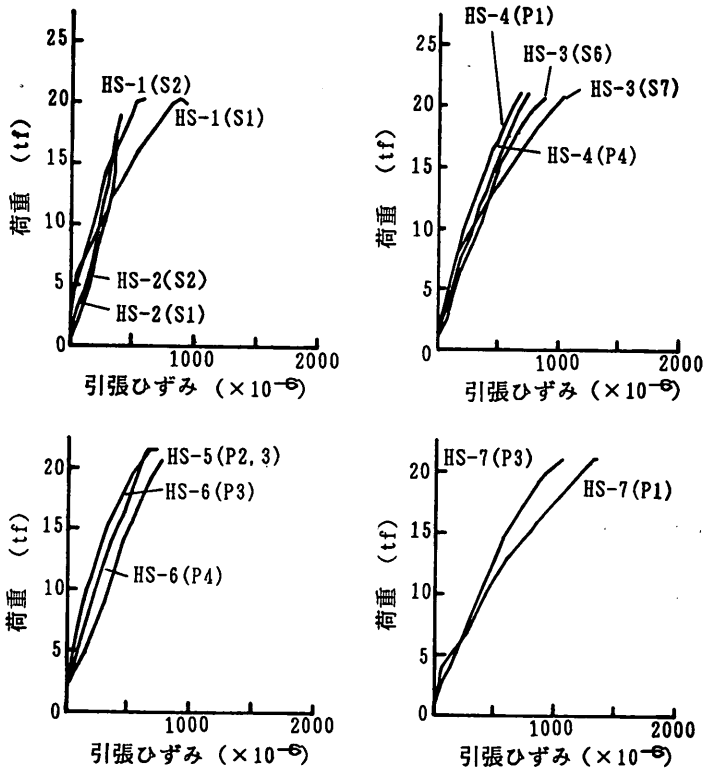


図-27 せん断補強鋼材のひずみの変化 ( $a/d = 4.8$ )

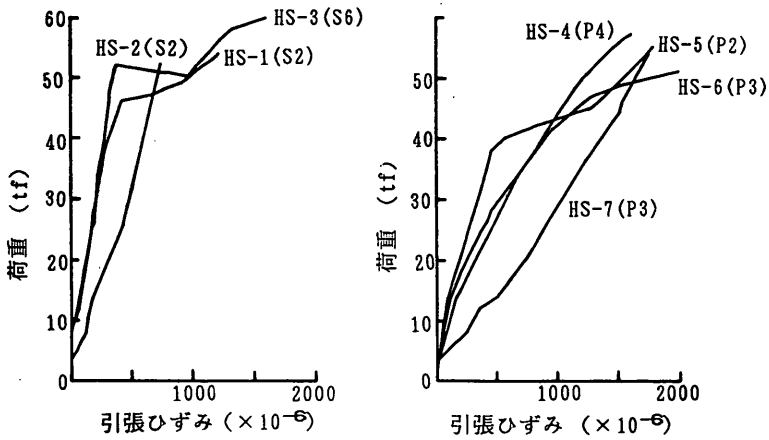


図-28 せん断補強鋼材のひずみの変化 ( $a/d = 1.8$ )

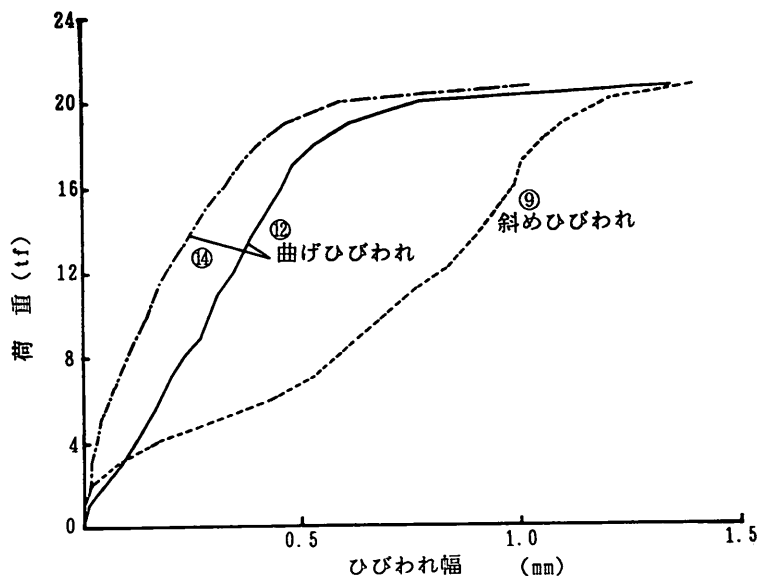


図-29 ひびわれ幅の変化 (HS-3,  $a/d=4.8$ )

曲げひびわれに関しては、荷重の増加とともにほぼ線形的にひびわれ幅が増加し、終局近傍で急激に大きくなった。一方、斜めひびわれでは、載荷荷重が2tf程度以下の小さなときには、曲げひびわれと同様の傾向を示したが、載荷荷重が2～3tfを過ぎると、急激にひびわれ幅が増大した。

### 5. ハイブリッドはりの構造設計法

4.で述べた試験結果の解析から、ハイブリッドはりの曲げ耐力、せん断耐力、座屈耐力およびひびわれ幅の算定方法についての考察を行う。これらの算定方法を用いれば、ハイブリッドはりの基本的な構造設計が一応可能となる。

#### 5.1 曲げ耐力の算定

ハイブリッドはりの曲げ耐力は、試験結果の考察から通常の鉄筋コンクリートはりに準じて算定することができる。すなわち、

- a) コンクリートの引張応力を無視する
- b) 平面保持を満足する (図-20および図-21)
- c) 鋼板とコンクリートとは完全合成とする

この内、b)およびc)の仮定を満足するには、適切な量のずれ止めを配置する必要がある。ここでは、ずれ止めの間隔などに関しては検討を加えてないが、今回のはり試験体での間隔程度でほぼこの仮定は満足されていると言える。

表-6 試験結果の一覧

	実験 (tf)	計算 (tf)	計 算 ①	計 算 ②	(tf) ③	実験/計算
HS-1	20.5	20.3	—	—	—	1.01
HS-2	18.0	20.3	—	—	—	0.87
HS-3	20.8	20.3	—	—	—	1.02
HS-4	21.0	20.3	—	—	—	1.03
HS-5	20.9	20.3	—	—	—	1.03
HS-6	21.7	—	21.0	25.7	24.0	1.03*
HS-7	20.9	—	21.0	25.7	24.0	1.00*

\*) 計算値は①のもの

表-6に  $a/d=4.8$  の曲げ載荷でのハイブリッドはりの曲げ耐力に関する試験結果と計算結果との比較を示す。計算は、コンクリート標準示方書 (1986年版)<sup>18)</sup> に準じた。すなわち、鋼板を等価な断面積を持つ鉄筋に置き換えた。オープンサンドイッチはりでは、HS-2を除いて試験結果と計算結果とは良く一致しており、はりの曲げ耐力を既往の方法で精度良く算定できた。

圧縮縁にも鋼板を配置したHS-6およびHS-7では、圧縮側板のかぶり高が0であり、かつ引張鋼板と圧縮鋼板の断面積が等しいため、このままでは曲げ耐力の算定ができない。したがって、ここでは、



①圧縮側鋼板を無視する方法

②中立軸を断面図心より上縁方向に移動させて、収束計算を行う方法

③コンクリートの圧縮応力を無視する方法

の3種類の計算手法を用いた。表-6に試験結果と計算結果との比較を示している。②および③の方法では、試験結果よりも計算結果が20%程度大きくなった。しかし、①の方法では、両者が良く一致した。これは、座屈により圧縮鋼板がほとんど圧縮力を負担しないためであり、試験で得られたひずみの傾向(図-22)で説明することができる。

5.2 座屈耐力の算定

ハイブリッドはりでは、圧縮鋼板の座屈耐力を検討する必要がある。試験で観察された座屈現象は、スパン中央のずれ止めの間で生じた。そこで、座屈耐力の算定式として Euler 座屈の式を用い、座屈長はずれ止めの間隔を与えて HS-6では300mm, HS-7では900mmとし、両端は固定端として算定した。

Euler 座屈の式は、以下のとおりである。

$$P_{cr} = k \cdot \pi^2 \cdot EI / l^2 \quad \dots(1)$$

ここで、

$P_{cr}$  : 座屈荷重

$k$  : 座屈係数(境界条件によって与えられる)

$k=1$ …両端ピン

$k=4$ …両端固定

$EI$  : 曲げ剛性

$l$  : 座屈長

座屈応力は、HS-6で2763kgf/cm<sup>2</sup>, HS-7で307kgf

/cm<sup>2</sup>となった。はりのスパン中央の圧縮縁にこの座屈応力を与える曲げモーメントを求め、荷重に換算した。この結果、HS-6では座屈耐力の算定値が21.0tfとなり、試験結果の21.7tfと良く一致した。しかし、HS-7では算定値が3.7tfとなり、試験結果の13.0tfと比較してかなり小さな値となった。座屈の判定は目視で行ったが、図-22から圧縮鋼板のひずみが座屈応力の算定値に相当するひずみ(約150×10<sup>-6</sup>)に達した際の荷重は5.0tf程度となり、算定値とはほぼ一致した。つまり、荷重の低い段階から徐々に座屈の現象が生じていたことになる。

また、ハイブリッドはりでは、座屈の現象が両端固定と両端ピンの中間の状態にあると考えられる。両端を固定すると安全側の設定となるが、圧縮側のずれ止めについては、ずれ止めの構造と配置間隔によりこの端部の条件が異なる。今回は詳細な検討ができなかったが、圧縮側の鋼板については、座屈を許さない設計法を採用するのが良い。

5.3 せん断耐力の算定

せん断耐荷機構は、図-30に示すようなタイドアーチ機構が主体となっていることが試験結果からわかった。表-7に  $a/d=1.8$  のせん断耐荷の場合での終局耐力の試験結果とせん断耐力の算定結果を示す。ここで、せん断耐力はせん断補強鋼材が負担するものとそれ以外が負担するものの和であるとした。せん断補強鋼材が負担する荷重は、試験結果から、せん断補強鋼材の降伏荷重と等しいと考えられる。また、せん断補強鋼材以外が受け持つ耐荷力として、今回は、

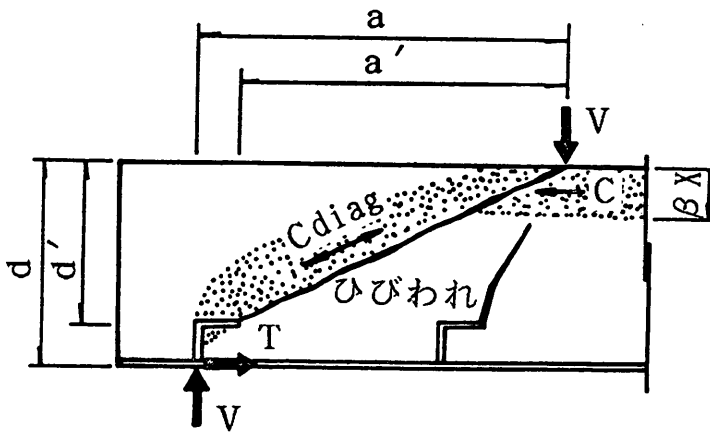


図-30 せん断耐力の算定

曲げおよびせん断を受けるハイブリッドはりの耐力特性

表-7 曲げ耐力の算定値

	実験 (tf)	計 算 (tf)				実 験 計 算*
		①	②	③	④	
HS-1	54.1	40.4	57.1	51.5	53.9	1.00
HS-2	52.0	40.4	57.1	51.5	53.9	0.96
HS-3	59.8	40.4	57.1	51.5	53.9	1.11
HS-4	56.2	40.4	57.1	51.5	53.9	1.04
HS-5	54.9	49.1	59.7	60.2	53.9	1.02
HS-6	62.5	39.0	68.2	51.5	61.7	1.01
HS-7	57.0	47.7	76.9	60.2	61.7	0.92

\*) 計算は④のもの

- ①コンクリート標準示方書の式<sup>18)</sup>
- ②ハイブリッドはりのせん断耐力に関する小沢らの提案式<sup>19)</sup>
- ③二羽の提案したディープビームのせん断耐力の算定式<sup>20)</sup> (ディープビームのせん断耐荷機構は今回のハイブリッドはりの耐荷機構に良く類似している)

を用いた。

①では、計算結果は試験結果に比べてかなり小さくなった。これは、標準示方書の算定式がはりのトラス機構によりせん断力に抵抗するという仮定で得られたものである。②および③では、計算結果と試験結果とが比較的良く一致した。しかし、さらに計算の精度を高めるため、これらの式の考え方を参考にして、次式によりハイブリッドはりのせん断補強鋼材以外が負担するせん断耐荷力 ( $V_c$ ) を算定した。すなわち、載荷点と支点上のずれ止めを結ぶコンクリートの圧縮応力が圧縮強度に達した際にせん断破壊が生じるとした。その際、図-30に示すような仮定を行った。すなわち、

- a) ひびわれがずれ止めの上端から発生するため、はりの有効高さ  $d$  は、はりの上縁からずれ止めのフランジ部までの  $d'$  距離とする。
- b) ひびわれがずれ止めの位置から発生するため、せん断スパン長  $a$  が見かけ上  $d'$  と小さくなる。
- c) 鋼板はせん断力に抵抗しない。

これらの仮定にしたがい、せん断耐力の算定式として次式を提案する。

$$V_c = k_1 \cdot f'_c \cdot \beta x \cdot \sin \alpha \quad \dots(2)$$

ここで、

$k_1$ : コンクリート強度に関する係数 (=0.85)

$\beta$ : コンクリートの圧縮域に関する係数 (=0.80)

$f'_c$ : コンクリートの圧縮強度

$x$ : 終局時の中立軸深さ

$\alpha$ : せん断スパン比を表す角度

$$(\alpha = \tan^{-1} d'/a')$$

この式により得られた計算結果を表-7の④に示すが、本試験の範囲で計算結果と試験結果とが非常に良く一致した。

5.4 ひびわれ幅の算定

コンクリートのひびわれ幅は、部材の耐久性の観点から十分な注意が払われなければならない。4.1 で示したように、ハイブリッドはりでは、ずれ止め位置などにひびわれが集中して入るために、鉄筋コンクリートはりと比較してひびわれ幅が大きくなる傾向があると考えられる。

現状では、ハイブリッドはりのひびわれ幅に関する算定式はないので、今回は、以下の方法でひびわれ幅の検討を行う。

- a) ひびわれはずれ止めから発生するので、ひびわれ間隔はずれ止めの間隔に等しいとする。
- b) 鋼板とコンクリートとはずれ止めで合成されているので、引張鋼板に生じたひずみと等しいひずみが周辺のコンクリートにも生じているとする。

この仮定により、次式を用いてひびわれ幅が算定できる。

$$w = \epsilon \cdot s \quad \dots(3)$$

ここで、

$w$ : ひびわれ幅

$\epsilon$ : 鋼板のひずみ

$s$ : ずれ止の配置間隔

この式を用いて、図-29に示したHS-3でのひびわれ幅を算定する。

曲げひびわれの計算結果と試験結果との比較を表-8に示す。試験でのひびわれ幅が若干ばらついているが、計算結果と試験結果とはおおむね良い一致が見られた。

従来の鉄筋コンクリートのひびわれ幅の制限値は、鉄筋のかぶり量の関数として与えられている<sup>17)</sup>。すなわ

表-8 せん断耐力の算定値

荷重 (tf)	試験結果 (mm)	計算結果 (mm)
5	0.04~0.15	0.11
10	0.15~0.29	0.26
15.5	0.30~0.45	0.45

ち、ひびわれ幅の制限は、海水などにより鋼材に著しい腐食を生じさせないと言う観点から行われている。しかし、ハイブリッド構造では鋼板の存在により、コンクリート内に海水、空気などが侵入しにくい。したがって、ひびわれ幅の制限の意味が耐久性の観点からすると明確ではない。ハイブリッドはりの場合は、はりの変形性能や合成の確保からひびわれ幅を考えるべきである。今回の試験から、常時の設計外力に対してハイブリッドはりは鉄筋コンクリートはりと同程度の変形能力を保持しており、特に有害なひびわれ性状を示していない。換言すれば、ひびわれ幅についてさほど重要視する必要は無いと言える。しかし、現状では、この課題に関して十分な議論が行われていない。設計の際にひびわれ幅が問題となるような場合には、ひびわれ制御用の鉄筋を配置する、あるいはずれ止めの配置間隔を狭くするなどの方策を採用してひびわれを分散させるのが良い。

## 6. 結 論

ハイブリッドはりの力学特性に関して、今回の荷重試験と解析で得られた主要な結論は以下のとおりである。

- ① セン断スパン比が4.8の供試体では、通常の鉄筋コンクリートはりと同じように曲げ破壊が卓越した。ずれ止めでの破壊は見られなかった。また、いづれのずれ止めおよびせん断補強の形式でも、試験体間の終局耐力は同程度であった。
- ② ハイブリッドはりの曲げ耐力は、通常の鉄筋コンクリートを対象とした算定式で求めることができた。ただし、圧縮側に鋼板がある場合にはこの鋼板を無視して計算を行えば、試験結果と計算結果とが良く一致した。
- ③ セン断補強を行っていないはりでは、計算耐力よりもかなり低い荷重でせん断補強を生じ、曲げ破壊に至らなかった。ハイブリッドはりでは、長尺スタッドなどを用いて十分なせん断補強を施さないと所定の曲げ耐力を得られなかった。
- ④ セン断スパン比が1.8の試験体では、支点近傍のずれ止めから斜めひびわれが発生した後、せん断補強筋の応力度が降伏強度に達して終局に至った。
- ⑤ セン断補強が十分なハイブリッドはりに関しては、はりのタイドアーチ効果およびずれ止めの高さを考慮した算定式でせん断耐力を精度良く算定できた。
- ⑥ コンクリートの圧縮側にある鋼板では、座屈の検討が不可欠である。座屈強度は、Eulerの式を用いて検討できるが、両端の境界条件には注意を払う必

要がある。

- ⑦ ハイブリッドはりの曲げひびわれは、ずれ止め位置から集中的に生じた。通常の鉄筋コンクリートはりのようにひびわれが分散しない傾向がある。このひびわれ幅は、引張鋼板に生じるひずみ量とずれ止めの間隔を乗じて精度良く算定することができた。

## 7. あとがき

ハイブリッド部材に関しては、設計基準やガイドラインの整備も行われてきており、徐々に港湾・海洋構造物の建設に向かっている。これまでの検討でハイブリッド部材の力学特性については解明されたと考えており、今後は構造物レベルでの設計施工の検討を行う必要がある。

本研究は、特別研究「ハイブリッド海洋構造物の設計等に関する研究」の一環として実施されたものである。

(1990年3月30日受付)

## 参 考 文 献

- 1) 土木学会：鋼・コンクリート合成構造の設計ガイドライン、構造工学シリーズ3、1989年3月、327p.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、Ⅲコンクリート橋編、1978年1月、pp.247~254
- 3) 土木学会：国鉄構造物設計標準解説、鋼とコンクリートとの合成鉄道橋、1983年5月、pp.327~356
- 4) 日本建築学会：各種合成構造設計指針同解説、1985年2月、255p.
- 5) 横田 弘、清宮 理：鋼・コンクリート合成部材での形鋼によるずれ止めの耐荷力、港湾技研資料 No. 595、1987年9月、24p.
- 6) 横田 弘、清宮 理：鋼-コンクリート合成はりのせん断補強鉄筋が終局耐力に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文報告集9-2、1987年、pp.531~536
- 7) 横田 弘、清宮 理：鋼・コンクリートハイブリッドはりの疲労特性、港湾技研資料 No. 658、1989年9月、23p.
- 8) 清宮 理、横田 弘：鋼・コンクリート合成構造の接合部の力学特性、第2回合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集、土木学会、1989年9月、pp.75~80
- 9) 横田 弘、清宮 理：鋼・コンクリートハイブリッド構造のL形接合部の力学特性、コンクリート工学年次論文報告集12-2、1990年
- 10) 浜田秀則、福手 勤、阿部正美、山本邦夫：海洋環境下における鋼-コンクリート接合ハイブリッド部材の鋼材部の腐食特性、コンクリート工学年次論文報告集12-1、1990年
- 11) 大野義郎、鈴木智郎、丹羽元和、井畔瑞人：北極海向け移動式石油掘削人工島の建設-コンクリート構造物に関して一、土木学会論文集、第354号/V-2、1985年2月、pp.43~52
- 12) 田村 徹、鈴木智郎：北海石油掘削人工島、コンク

曲げおよびせん断を受けるハイブリッドはりの耐力特性

- リート工学, Vol. 24, No. 3, 1986年3月, pp. 85~88
- 13) 田中征登, 植村俊郎, 若菜弘之, 綿引 透: ハイブリッド構造のケーソン等港湾構造物への適用, 第2回合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, 1989年9月, pp. 385~390
  - 14) 日本鋼構造協会: 複合構造—複合構造システム小委員会報告一, 1987年5月, pp. 104~110
  - 15) 清宮 理, 横田 弘: 形鋼によるずれ止めの耐力評価, 合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, 1986年9月, pp. 113~118
  - 16) たとえば, Park, R and Paulay, T: Reinforced Concrete Structures, John Wiley & Sons, Inc., 1975. pp. 288~291
  - 17) 土木学会: コンクリート標準示方書【昭和61年制定】設計編, 1986年, pp. 74~84
  - 18) 土木学会: コンクリート標準示方書【昭和61年制定】設計編, 1986年, pp. 46~55
  - 19) 小沢一雅, 田中征登, 上田多門: 鋼コンクリート合成構造のせん断耐荷機構, 第8回コンクリート工学年次講演会論文集, 1986年, pp. 777~780.
  - 20) 二羽淳一郎: FEM解析に基づくディープビームのせん断耐荷力算定式, 第2回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 (JCI-C5), 1983年10月, pp. 119~126.