

鋼・コンクリートハイブリッドはりの力学特性に関する研究

横田 弘*・清宮 理**

鋼板とコンクリートにより構成されるハイブリッドはりを対象に曲げおよびせん断耐荷試験を実施し、破壊形式、終局耐力、ひびわれ性状などの基本的な力学特性を把握した。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、圧縮鋼板の座屈耐力およびひびわれ幅の算定方法を提案した。

Keywords : steel-concrete hybrid beam, loading tests, flexure, shear, crack

1. はじめに

鋼板とコンクリートを組合せたハイブリッド構造は、両材料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これまでにいくつかの適用事例がある。一方、海洋構造物では、鋼材あるいは鉄筋コンクリートが単体で、あるいは混合的に従来より用いられており、ハイブリッド構造が採用された例はほとんどない。しかし、今後の多様な海洋開発の要請および進展に伴い、防波堤、護岸などの港湾施設や沈埋トンネルなどの様々な構造物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海洋構造物に採用する場合には、耐力や変形性能などの力学特性の向上、軽量化、鋼板による水密性の確保、型枠・支保工の簡略化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整備されていない¹⁾。特に、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、海洋環境の特殊性を考慮する必要がある。

本論文では、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について述べる。特に、ハイブリッドはりでは、ずれ

止めの箇所にはひびわれが集中する傾向にある²⁾。このような状況下におけるはり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考察する。また、そのような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方法を提案する。

2. ハイブリッド構造の概要

本論文で取り扱う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-1に示す。海洋構造物では、鋼板を部材の片側のみに配置したオープンサンドイッチ構造と鋼板を部材の両側に配置したサンドイッチ構造の2種類の形態がある。

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荷力やじん性が得られる。このことは、フーチングなど部材の長大化が可能となるとともに、部材の形状・寸法に大きな自由度をもたせることができる。同時に、部材の重量が全体として軽くなるので、浮体構造や軟弱地盤上に設置される構造物に有利となる。

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、工期、製作場所などを考えると全体として安価に建設される場合が多い。

ハイブリッド構造を有効に機能させるためには、鋼板とコンクリートとを確実に一体化させる必要がある。筆者らは、山形鋼などの形鋼を用いてずれ止めとすること

*正会員 工修 運輸省第二港湾建設局 横浜調査設計事務所
次長 (〒220 横浜市西区高島1-2-5)

**正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 構造部構造強度研究室長

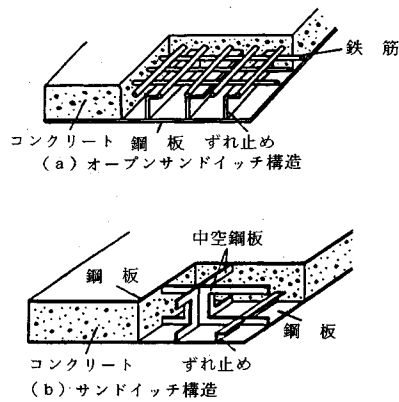


図-1 ハイブリッド構造の概要

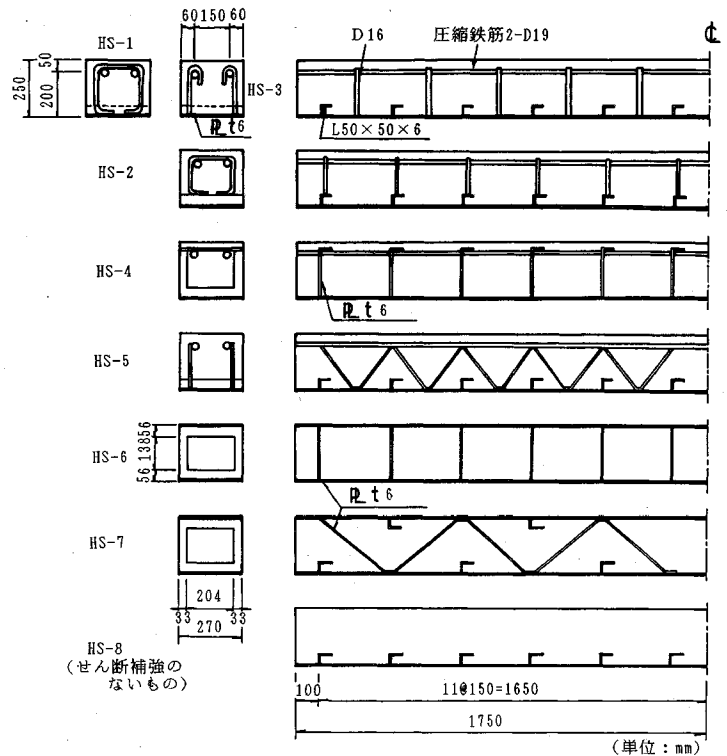


図-2 はり試験体の構造

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ができる。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の算定法については、既に明らかにされている³⁾。

ハイブリッド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⁴⁾、ひびわれと鋼材の腐食および接合部（隅角部）の構造細目^{5),6)}に関して検討が行われる。本論文は、この内、曲げ耐力、せん断耐力およびひびわれを中心にまとめたものである。

海洋環境下での耐久性に関しては、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、外部との空気や水の交換がない状況であるので、内側鋼板の腐食に対する特別な配慮は不要と考えられる。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での使用は極力避けることや、やむを得ないときには防食対策が必要である。常時海水中や海底地盤内にある場合には腐食量もかなり小さいので、防食対策を施せば、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、濱田ら⁷⁾により研究が進められている。

3. 載荷試験

(1) 試験体

はり試験体の構造・寸法を図-2に示す。はり試験体は、各種のせん断補強を有する5種類のオープンサンドイッチはり(HS-1~HS-5)および同じく2種類のサンドイッチはり(HS-6およびHS-7)である。さらに、せん断補強を行っていないはり試験体としてオープンサンドイッチはり(HS-8)およびサンドイッチはり(HS-9)を比較のために作製した。HS-1~HS-7の各々のはりの基本寸法は同一で、断面の幅が270 mm、高さが250 mmおよび全長が3500 mmである。

HS-1~HS-5の5種類のはりは、板厚6 mm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50 mm、肉厚6 mmの山形鋼を用い(HS-4を除く)、300 mm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、1箇所当たりの溶接長を約40 mmとし、ほぼ等間隔の5箇所に溶接を施した。また、溶接の脚長は6 mm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50 mm下方の位置に配筋した。

はりのせん断補強には、図-2に示すように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

表—1 鋼材の機械的性質

種類	規格・寸法 (mm)	降伏強度 (kgf/mm ²)	引張強度 (kgf/mm ²)	伸び (%)
鋼板	SS400 t=6	39	48	27
ずれ止め	SS400	32	46	27
鉄筋	SD295 D19	39	57	21
鉄筋	SD295 D16	38	55	22

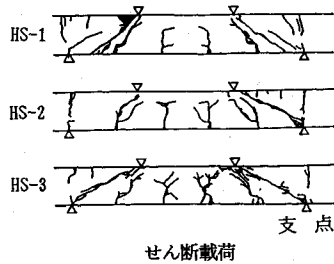
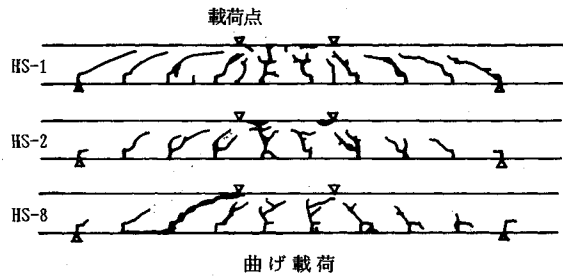
表—2 試験結果の概要

	a/d	P _{max} (tf)	δ _u (mm)	P _{cr} (tf)	P _{bu} (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	せん断破壊
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, δ_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_{bu}: 圧縮側鋼板座屈荷重

ラップ状に加工し、鋼板に約 50 mm 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。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 6 mm 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ぬき加工して用いた。HS-5 では 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 300 mm である。

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た。この際、D16 鉄筋の有効せん断抵抗面積と等しくなるように中



図—3 ひびわれ発生状況

ぬき加工した鋼板（中空鋼板）を 300 mm の間隔で両縁の鋼板にすみ肉溶接した。HS-7 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。

せん断補強を施していない HS-8 と HS-9 については、はり断面の幅が 400 mm であるが、主鋼材比は他のはりとほぼ同じである²⁾。また、HS-8 については曲げ載荷時のひびわれ性状も合わせて調べることにしているため、ずれ止めには山 (I) 形鋼の他にも、T 形鋼、みぞ形鋼およびスタッドジベルを採用した試験体も製作した。同時に、山形鋼のずれ止めを用いた試験体では、ずれ止めの間隔を 300 mm の他にも 200 mm, 400 mm および 500 mm とした試験体も合わせて製作し、載荷試験に供した。

(2) 材料の特性

試験体に用いた鋼材の機械的性質を表—1 に示す。コンクリートの配合は、粗骨材の最大寸法が 10 mm, スランプ値が 8 ± 2.5 cm, 空気量が 5 ± 1% を満足するように決定した。載荷試験時でのコンクリートの圧縮強度 (φ10 × 20 cm 円柱供試体による) および曲げ強度 (10 × 10 × 40 cm 角柱供試体による) は、それぞれ曲げ載荷 (後述する) 用はりで 267 kgf/cm² および 43.3 kgf/cm², せん断載荷用はりで 287 kgf/cm² および 47.6 kgf/cm² であった。

試験体の製作に当たっては、はりの側面方向からコンクリート打設を行い、ずれ止めでの欠陥をできるだけ防いだ。

(3) 試験方法と計測方法

載荷試験は、はりの支点2点を単純支持する方法で行った。載荷スパンは、曲げ載荷では a/d (せん断スパン比) = 4.8, せん断載荷では $a/d=1.8$ となるように設定した。ただし、曲げひびわれ幅の検討については、 $a/d=4.8$ の条件下のみで載荷を行った。

載荷試験では、静的な単調増加荷重をはりに作用させた。この際、載荷ステップは、曲げ載荷で約 0.5 tf, せん断載荷で約 1.0 tf とした。各載荷ステップでは、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を行った。

はりのたわみは、容量 50 mm 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 30 mm, 鋼材用が測定長さ 6 mm の電気抵抗線式ひずみゲージを用いた。鋼板のひずみゲージは、はり断面方向中心位置の外面に貼付した。曲げ載荷試験でのひびわれ幅の計測は、標点間隔 100 mm のパイ型変位計を使用し、はりの下縁より 5 cm 上方のはり側面で行った。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。

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-2 に示す。ここで、HS-8 および HS-9 では、はりの幅の違いを補正した後の値を示している。

(1) ひびわれおよび破壊の状況

はりの終局時におけるひびわれ発生状況を図-3 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。

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が、一部のはりでは、引張側鋼板が降伏してから、さらにずれ止め位置間のせん断補強鋼材を溶接してある位置付近からも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に進展したが、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。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、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ような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。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、圧縮側の鋼板を配置して鋼材比を増加させたにもかかわらず

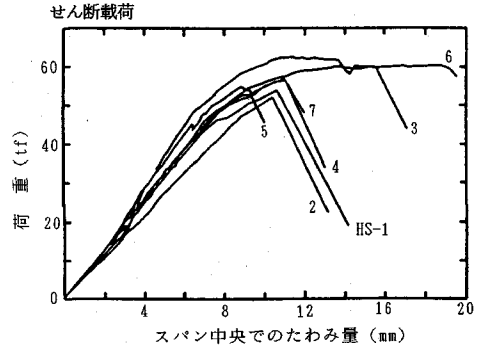
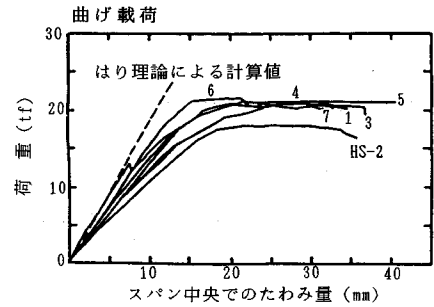


図-4 荷重とスパン中央でのたわみ量との関係

ず、圧縮鋼板の座屈のために終局耐力がほとんど上昇しなかった。

せん断載荷の場合では、ほとんどのはりで斜めひびわれが発生した。この斜めひびわれは、載荷点と支点位置のずれ止めを結んだ。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、斜めひびわれの発生後、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、若干値の低くなった HS-2 を除く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、既に述べたように、圧縮鋼板が座屈する現象が見られた。曲げ載荷の場合、HS-6 では 21.7 tf, HS-7 では 13.0 tf で座屈現象が顕著に現れた。また、せん断載荷の場合には、HS-6 では 61.9 tf, HS-7 では 19.0 tf で座屈が顕著となった。いずれの載荷形態でも、HS-6 では鋼板の座屈と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。

(2) はりのたわみ

曲げ載荷時およびせん断載荷時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-4 に示す。曲げ載荷では、いずれのはりでも最大荷重に達した後もたわみが進行し、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

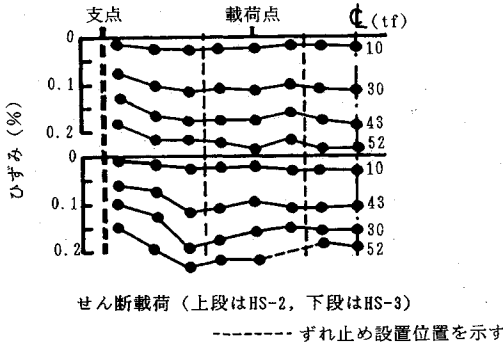
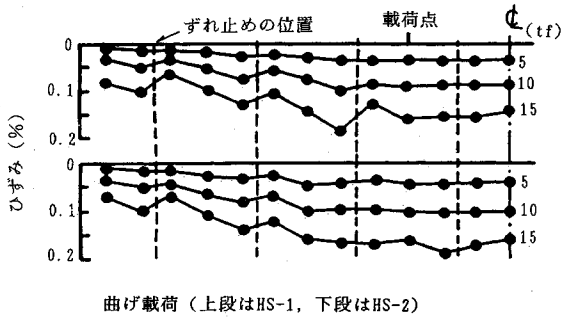


図-5 引張鋼板のひずみ分布

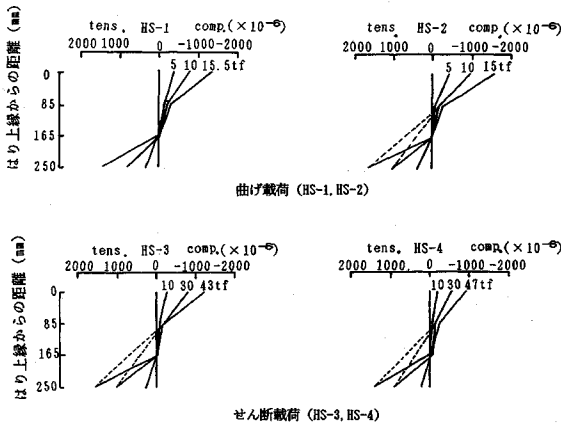


図-6 スパン中央のはり断面でのひずみ分布

では圧縮側鋼板の座屈が生じたが、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。

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る。一方、もう1つのサンドイッチ構造であるHS-7では、オープンサンドイッチ構造のものと同様の傾向を示した。これ

は、せん断補強鋼材の間隔が広すぎた結果、十分な量の鋼材量とならなかったためである。これらのことから、せん断スパン比の小さい場合には、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とも有していたためである。

単純はりの理論から求めたたわみの計算結果を図-4に合わせて示すが、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同様であった。

(3) 鋼材に生じたひずみ

図-5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。

曲げ載荷の場合には、曲げスパン(曲げモーメント一定区間、荷重点より内側である)内でのひずみはほぼ一定となった。せん断スパン内(荷重点より外側)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スパン内での耐荷機構は、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、せん断載荷の場合では、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整理した結果を図-6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)ではほぼ0となる分布を示した。コンクリート圧縮縁、はり上縁から80mm付近、および引張縁でのコンクリートひずみ量および鋼板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、および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

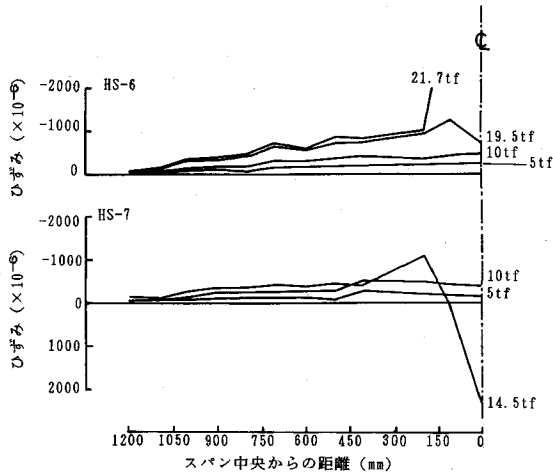
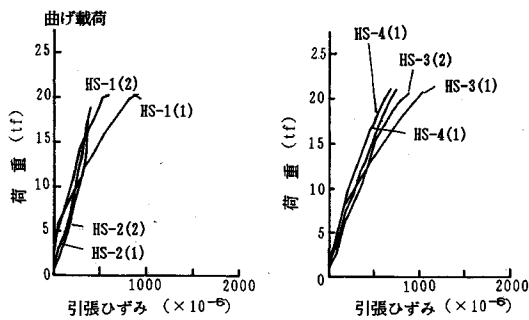


図-7 圧縮鋼板のひずみ分布 ($a/d=4.8$)



(1)はせん断スパンの中央、(2)は(1)より1本載荷点寄りのせん断補強鋼材での測定結果を示す

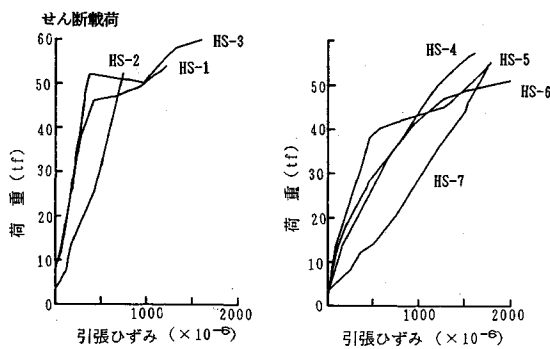


図-8 せん断補強鋼材のひずみ

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は、ハイブリッドはりの曲げ耐力の算定に適用可能であることが確認された。

HS-6およびHS-7での圧縮鋼板のひずみの分布を図-7に示す。荷重10tf程度以下において鋼材上縁には、曲げ載荷の場合では最大 500×10^{-6} 、せん断載荷の場合では最大 200×10^{-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

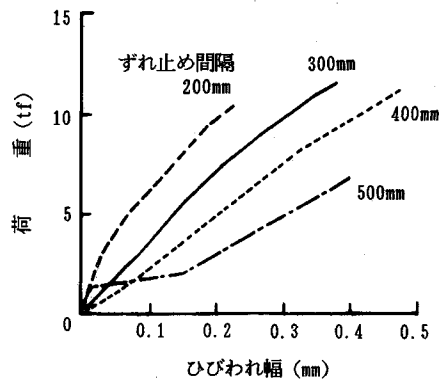


図-9 ずれ止めの配置間隔がひびわれ幅に与える影響

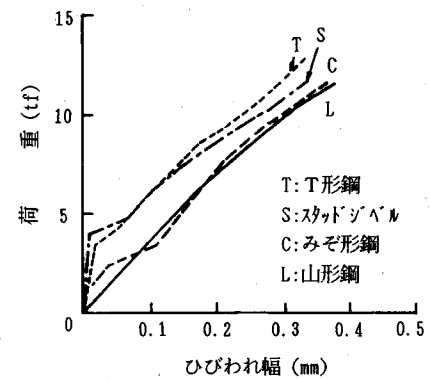


図-10 ずれ止めの形状がひびわれ幅に与える影響

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。座屈が一旦生じると、圧縮鋼板は、はりの耐荷力に大きく寄与しない結果となった。

せん断補強鋼材に発生したひずみと荷重との関係を図-8に示す。これらは、主にせん断スパン中央のせん断補強鋼材での測定結果である。曲げ載荷の場合には、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、いずれのはりでも終局時のひずみは 1000×10^{-6} 程度となり、降伏ひずみには至らなかった。

一方、せん断載荷の場合では、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後に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て、せん断補強鋼材の応力が増加した後、降伏応力度に達して終局状態になる現象が認められた。これらのことから、ハイブリッドはりのせん断耐力は、はりのタイドアーチ機構から得られるコンクリートのせん断耐力と

表—3 曲げ耐力の試験結果と計算結果

	実験 (tf)	計算 (tf)	計 算 (tf)			実験 計算
			①	②	③	
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—4 セン断耐力の試験結果と計算結果

	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

*) 計算値は④のもの

せん断補強鋼材の引張耐力（降伏強度）の和で求めることができると考えられる。

鋼材のひずみに関しては、特に言及した以外のはりでもほぼ同様の傾向を示した⁸⁾。

(4) ひびわれ幅

ずれ止め間隔を変化させた場合のひびわれ幅の計測値と荷重の関係を図—9に示す⁹⁾。ひびわれ幅はずれ止め間隔が短いほど小さくなり、今回の載荷試験の範囲では両者の関係はほぼ線形であった。

ずれ止めの種類を変化させた場合のひびわれ幅の計測結果を図—10に示す。ずれ止めの高さは同じであるが、スタッドジベルあるいはT形鋼を用いたものは初期ひびわれの発生が他のものよりも若干遅くなる傾向が見られた。しかし、ひびわれ幅の傾向は、各はり間でほとんど同様であった。また、ハイブリッドはりでは、ずれ止めよりひびわれが集中して発生するが、ひびわれ幅やひびわれの分散性に関して、特に有害な性状を示していなかった。

5. ハイブリッドはりの構造設計法

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、座屈耐力および曲げ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ることにより、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。

(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。この前提条件として、適切な量のずれ止めを配置する必要がある。ここでは、ずれ止めの耐荷力や間隔などに関しては検討を加えないが、今回のはり試験体での配置間隔とずれ止め量で鋼板とコンクリートとは結局時までほぼ一体化されていた。

表—3に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。計算では、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（限界状態設計法）で精度良く算定できた。

HS-6およびHS-7では、圧縮鋼板のかぶり量が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。この際、鋼材の応力-ひずみ関係は、完全弾塑性のbi-linearモデルを仮定した。表—3に示したとおり、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、座屈により圧縮側鋼板がほとんど圧縮力を負担しなくなった結果によるものであり、載荷試験で得られたひずみの傾向(図—7)と一致していた。

(2) 鋼板の座屈耐力の算定

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。

座屈応力の計算結果は、HS-6で2763kgf/cm²、HS-7で307kgf/cm²となった。はりスパン中央の圧縮縁にこれらの値の座屈応力を与える曲げモーメントをはり理論により求め荷重に換算した結果、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、

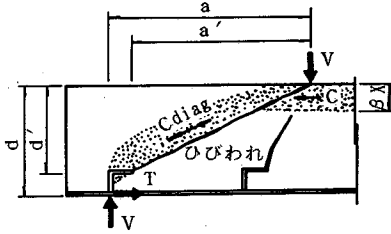


図-11 セン断耐荷のメカニズム

試験結果の 13.0 tf と比較してかなり小さな値となった。載荷試験での座屈の判定は目視で行っているため、両者に違いが生じたものと考えられる。そこで、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^{-6} ）に達した際の荷重を図-7を用いて求めると 5.0 tf 程度となり、算定値とほぼ一致した。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。両端を固定と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。今回はこの点に関する詳細な検討ができなかったが、圧縮側の鋼板の座屈は、繰り返し荷重を受けたとき、はりの耐力の低下を招くので注意が必要である。

(3) セン断耐力の算定

セン断耐荷の場合の終局耐力の試験結果とセン断耐力の計算結果を表-4に示す。セン断耐力の計算結果は、以下に述べるように、セン断補強鋼材が負担するものとセン断補強鋼材以外（コンクリートが主）が負担するものの和であるとして求めた。

この内、セン断補強鋼材が負担するせん断力は、試験の結果に基づき、せん断補強鋼材の降伏強度を用いて次式¹⁰⁾で求めた。

$$V_s = A_w \cdot f_{wy} (\sin \alpha_s + \cos \alpha_s) / s_s \cdot z \dots \dots \dots (1)$$

- ここで、 A_w ：せん断補強鋼材の断面積
- f_{wy} ：せん断補強鋼材の降伏強度
- α_s ：せん断補強鋼材が部材軸となす角度
- s_s ：せん断補強鋼材の配置間隔
- z ：圧縮応力の合力の作用位置から引張鋼板までの距離

一方、試験結果から、ハイブリッドはりのせん断耐荷機構は、図-11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わかった。したがって、今回の検討では、せん断補強鋼材以外が負担するせん断力として、

- ① コンクリート標準示方書の式で、安全係数の値を 1.0 に設定したもの¹⁰⁾
- ② ハイブリッドはりのせん断耐力に関する小沢らの

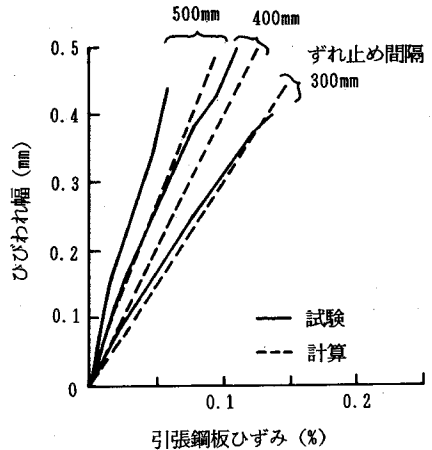


図-12 引張鋼板のひずみとひびわれ幅の関係

提案式¹¹⁾

③ ディープビームのせん断耐力の算定式¹²⁾（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）

④ タイドアーチ機構に基づいて今回提案するせん断耐力の算定式

の4とおりの手法を用いた。

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。今回の耐荷機構と異なっているためである。

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-11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 d は、はりの上縁からずれ止めのフランジ部までの距離 d' 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 a' 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、 V_c の算定式として次式を提案する。

$$V_c = b \cdot k_1 \cdot f_c \cdot \beta x \cdot \sin \alpha \dots \dots \dots (2)$$

- ここで、 b ：断面の幅
- k_1 ：コンクリート強度に関する係数(=0.85)
- β ：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
 α : せん断スパン比を表わす角度
 ($=\tan^{-1} d'/a'$)

式(1)および式(2)により得られたせん断耐力の計算結果を表-4の④に示す。式(1)における z の値としてa)の仮定を適用した結果、せん断補強鋼材が受け持つせん断力は約8.8tfとなった。本試験の範囲では、④の計算結果と試験結果とが非常に良く一致し、はりのせん断耐力の算定に有効であることがわかった。今回の検討ではハイブリッドはりのせん断耐力はこれら両者を累加する方法で表現したが、せん断抵抗のメカニズムについては、今後の詳細な検討が必要であると思われる。

(4) ひびわれ幅

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の位置から発生するので、ひびわれ間隔はずれ止めの間隔に等しいとする。

b) 荷重段階が小さい範囲では、鋼板とコンクリートとはずれ止めで完全合成されているので、ずれ止め間の引張鋼板に生じたひずみと等しいひずみがコンクリートにも平均的に生じているとする。

この仮定により、ひびわれ幅は鋼板ひずみとずれ止め間隔の積で算定できる。この結果から得られたひびわれ幅と鋼板の平均ひずみ量との関係を図-12に示す。鋼板のひずみ量は、ずれ止め間隔の中心位置で測定したものである。

ずれ止め間隔が300mmと400mmの場合は、この考え方でひびわれ幅の計算値と試験結果とが良く一致した。ずれ止め間隔が500mmの場合には試験結果は計算値よりも若干小さな値となった。今回の試験では平均ひずみを用いたが、ずれ止め間隔が長くなればひびわれ幅の計算に用いるのは問題があった。しかし、通常のずれ止め間隔の範囲では、今回検討した方法でひびわれ幅の計算が精度良くできることがわかった。

6. 結 論

ハイブリッドはりの力学特性に関して、今回の曲げ載荷試験($a/d=4.8$)とせん断載荷試験($a/d=1.8$)およびこれらの解析で得られた主要な結論は以下のとおりである。

① 曲げ載荷を受けるはりでは、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、今回提案したせん断補強のいずれの形式でも、はりの終局耐力は同程度であった。

② せん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破壊を生じ、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す必要がある。

③ 適切なせん断補強を施した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。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っても、十分はりの曲げ耐力を推定できた。

④ せん断載荷の場合では、支点位置のずれ止から斜めひびわれが発生した後、せん断補強筋の応力が降伏強度に達して終局に至った。

⑤ せん断補強が十分に施されたハイブリッドはりのせん断破壊は、せん断ひびわれに沿ったコンクリートの圧縮力と鋼板の引張力によるタイドアーチ機構で説明できた。せん断耐力の算定では、このタイドアーチ機構を基に、リップの存在を考慮したせん断スパン長および有効高さの修正を行うと実験結果と良く一致した。

⑥ ハイブリッドはりの曲げひびわれは、ずれ止め位置から生じた。通常の鉄筋コンクリートはりのようにひびわれが分散せず、ひびわれ幅も大きくなる傾向があった。ずれ止めから発生するひびわれ幅は、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

ハイブリッド構造を有する海洋構造物に関しては、設計ガイドラインの整備¹³⁾も徐々に進められ、実構造物の建設事例も増加している。今回の検討でハイブリッド部材の基本的力学特性についてはほぼ解明されたと考えている。今後は波浪による疲労の問題と構造物レベルでの施工方法の検討が必要であり、これらについては今後報告していく予定である。

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、327p.、1989年3月。
- 2) 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、pp.113~118、1986年9月。
- 3) 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力、港湾技研資料、No.595、24p.、1987年9月。
- 4) 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、23p.、1989年9月。
- 5) 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、pp.75~80.、1989年9月。
- 6) 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、pp.17~22、1990年。
- 7) 濱田秀則・福手 勤・阿部正美：鋼-コンクリート接合ハ

- イブリッド部材の海洋環境下における耐久性，港湾技術研究所報告第29巻4号，pp.119～168，1990年12月。
- 8) 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，pp.531～536，1987年。
 - 9) 横田 弘・清宮 理：鋼・コンクリートハイブリッドはりのひびわれ性状，土木学会第45回年次学術講演会，pp.802～803，1990年10月。
 - 10) 土木学会：コンクリート標準示方書【昭和61年制定】設計編，pp.48～55，1986年。
 - 11) 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，pp.777～780，1986年。
 - 12) 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），pp.119～126，1983年10月。
 - 13) (財)沿岸開発技術研究センター：合成版式ケーソン設計マニュアル，202p.，1991年3月。

(1991.8.14 受付)

STRENGTH AND CRACK BEHAVIORS OF STEEL-CONCRETE HYBRID BEAMS

Hiroshi YOKOTA and Osamu KIYOMIYA

Hybrid structures with steel plates and concrete have considerable potential for use in offshore facilities. In those structures, steel plates will be seen either on one surface only or both surfaces of structural members. For the hybrid structures, adequate shear reinforcement is required to obtain appropriate mechanical properties. Flexural and shear resisting mechanisms have to be developed. This paper presents the results of flexural and shear loading tests on hybrid beams with newly proposed shear reinforcement. Furthermore, load carrying mechanisms against shear and flexural forces are investigated and their design methods are established based on the test results.