

論文

[2007] 鋼・コンクリート合成ばりの疲労特性

正会員 ○ 横田 弘 (運輸省港湾技術研究所)

正会員 清宮 理 (運輸省港湾技術研究所)

1. はじめに

鋼材とコンクリートとを合成した部材は、合成床版、鉄骨鉄筋コンクリート柱などの陸上構造物で良く利用されている。海洋環境下で合成構造が使用された例はこれまで少ないが、図-1に示すような港湾構造物(防波堤、沈埋トンネルなど)への利用が進められている。合成部材は、鋼板と鉄筋コンクリートとをずれ止めにより合成したもので、ずれ止めには形鋼が用いられる。この部材は、鋼とコンクリートのそれぞれの長所を生かし、短所を補い合う構造様式である。また、鋼板を使用することで、部材の軽量化、施工の迅速化および水密性の向上などの利点も期待でき、海洋環境下での構造物の建設に有効である。

合成構造の海洋構造物への適用には、部材の力学性状や耐久性などを十分に把握して、設計体系を整備していく必要がある。既に、ずれ止めを用いた形鋼の耐荷力の算定¹⁾および合成ばりの静的力学特性と曲げ・せん断耐荷力の算定²⁾については明らかにされている。海洋構造物の主たる外力は波浪によって与えられるが、このような繰返し荷重に対する疲労特性の把握ならびに疲労破壊に対する安全性の評価が重要となる。この部材では溶接工法を多用しており、疲労の検討が不可欠であるが、この種の部材の疲労特性を検討した研究はほとんどない。

本報告では、鋼・コンクリート合成ばりの疲労特性を繰返し載荷試験により把握し、波浪外力に対する疲労破壊の安全性について検討した結果を述べる。

2. 試験の概要

載荷試験は、図-2に示す3種類のはり試験体を対象に行なった。各々のはりの基本寸法は、幅27cm、高さ25cm、長さ350cmである。HF1およびHF2は、鋼板(板厚6mm)を引張縁のみに配置した構造で、辺長5cmの山形鋼をずれ止めとして30cm間隔で鋼板にすみ肉溶接した。また、圧縮鉄筋としてD19筋2本を上縁より5cmの位置に配筋した。せん断補強には、HF1ではD16の長尺スタッドを加工したもの、HF2ではD16筋をスターラップ状に加工したものをそれぞれ鋼板に溶接して用いた。HF3は鋼板を圧縮、引張両縁に配置した構造で、D16鉄筋に等しいせん断抵抗断面積を有するように中空加工した鋼板を溶接して、ずれ止

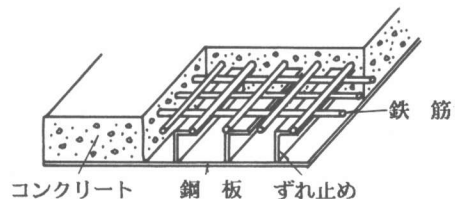
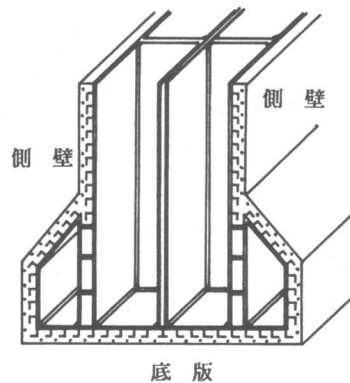


図-1 合成部材を用いた防波堤ケーソン部材とその断面

めとせん断補強に兼用した。

試験体製作に用いた鋼材の機械的性質を表-1に示す。コンクリートは、骨材最大寸法が10mm、水セメント比が44%のものを用いた。載荷試験時のコンクリートの圧縮強度は約300kgf/cm²であった。

はりの載荷試験は、容量50tfの油圧式振動疲労試験機を用い、スパンを300cm、せん断スパン比を4.8とする対称2点載荷で実施した。このせん断スパン比では、曲げ破壊が卓越する²⁾。

疲労試験は、周波数2Hzの正弦波形繰返し荷重を載荷して実施した。荷重の下限値は全てのはりで1.0tfと一定にし、上限値ははりの静的耐荷力の20%~60%とした。試験は、はりが疲労破壊するか載荷回数が200万回に達するまで行った。

載荷回数が所定の回数に達するごとに静的載荷を行って、各種計測を実施した。計測項目は、はりのスパン中央のたわみ、鋼板、ずれ止め、および鉄筋のひずみ、ひびわれ幅である。たわみは変位計、ひずみは電気抵抗線式ひずみゲージ、ひびわれ幅は標点間隔10cmのコンタクトゲージで測定した。

3. 試験結果および考察

(1) 疲労耐力

はり試験体が疲労破壊に至った際の載荷回数の一覧を表-2に示す。ここで、繰返し荷重の上限値とはりの静的耐荷力との比をSと定義している。各試験体の静的荷重耐荷力は、HF1、HF2およびHF3でそれぞれ19.0tf、19.5tfおよび22.0tfであった。図-3に同表の結果を整理して、Sと破壊に至った載荷回数との関係(S-N線図)を示す。各試験体タイプ間で疲労耐力に関して有意な差は認められず、ほぼ同様の疲労特性を示した。繰返し載荷回数が200万回に達しても疲労破壊に至らなかった場合の荷重比は20%程度で、通常の

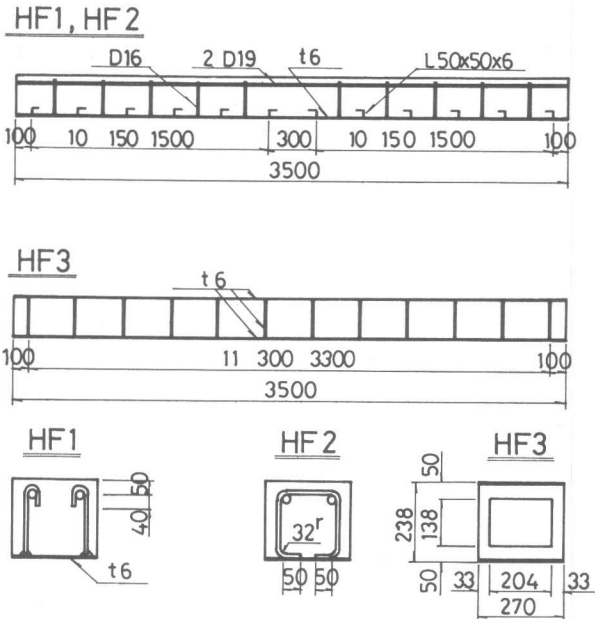


図-2 試験体の形状・寸法 単位：mm

表-1 使用鋼材の機械的性質

種類	規格	降伏強度 kgf/mm ²	引張強度 kgf/mm ²	伸び %
鋼板	SS41 t6	36	47	27
ずれ止め	SS41 L50X50X6	32	46	27
鉄筋	SD30 D16	39	56	27
鉄筋	SD30 D19	39	56	27

表-2 疲労試験結果の一覧

S	HF1	HF2	HF3
0.6	63550	77720	69000
0.5	-	128090	187400
0.4	378690	289630	327000
0.3	924820	1256930	1058790
0.2	>2000000	>2000000	>2000000

鉄筋コンクリートはりの結果³⁾と比べてかなり小さな値を示した。したがって、合成はりの疲労耐力は小さいと言える。また200万回載荷後に行った静的載荷試験では、処女載荷時とほぼ同様の最大荷重および剛性が得られた。

(2) ひびわれおよび破壊性状

図-4に試験終了後の試験体のひびわれ発生状況を示す。コンクリートのひびわれはずれ止めの位置から発生し、上方へ進展した。載荷回数の少ない間は曲げひびわれが卓越しており、破壊直前になってせん断ひびわれも一部で見られた。また同様に、コンクリートの圧縮破壊による剥落も生じた。

HF3では、ひびわれがほとんど発生せず、ずれ止めとコンクリートとの剥離が観察されたのみであった。全ての試験体で、ひびわれ幅は載荷回数にかかわらず、ほとんど一定の値となった。

疲労破壊の生じたはりでは、いずれも引張側鋼板の破断が認められた。鋼板破断が生じた位置は、図-4の○で示すように、HF1およびHF2では載荷点に最も近いせん断補強鉄筋と鋼板との溶接位置付近、HF3ではずれ止め鋼板と鋼板との溶接位置付近であった。これは、溶接位置で応力集中が生じたことによるものである。コンクリートの圧縮破壊などの現象は、鋼板の破断によって生じるはりの変形の増大が起因しているものと考えられ、疲労は引張側の鋼板に集中して生じた。

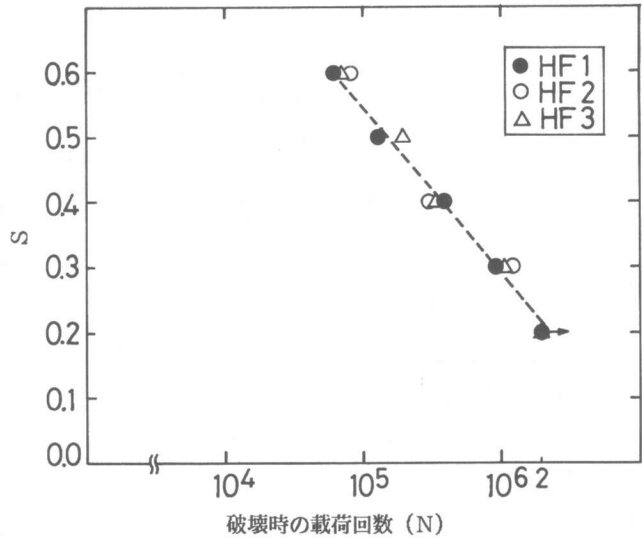


図-3 合成はりのS-N線図

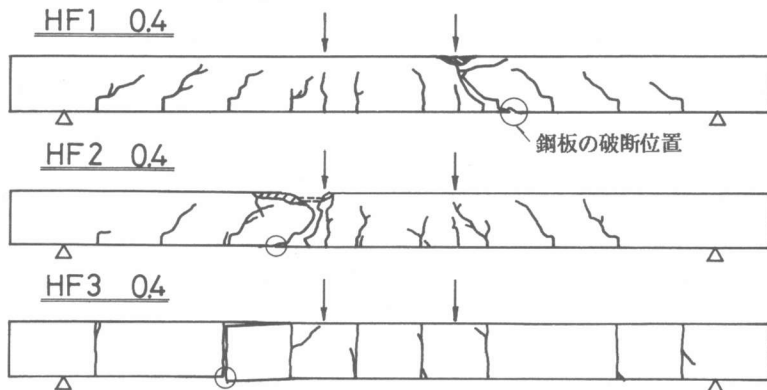


図-4 破壊時のひびわれ性状

(3) たわみ性状

HF 2での荷重回数とはりスパン中央におけるたわみ振幅（上限荷重時のたわみと下限荷重時のたわみとの差）との関係を図-5に示す。たわみ振幅は、全ての試験体でほとんど同様の傾向を示し、荷重回数が増加してもほとんど初期荷重時の値と同じであった。すなわち、前述のように、繰返し荷重に伴う断面剛性の低下はほとんどなく、疲労破壊は鋼板の破断によって突然生じたと言える。

(4) 鋼材のひずみ

図-6にHF 2で得られた破断位置付近での鋼板のひずみの測定結果を示す。鋼板のひずみはたわみの測定結果と同様、荷重回数が増加してもほとんど変化がなく、疲労破壊の直前になって、ひずみが急増したのもあった。

また、HF 3でのはり軸方向の鋼板ひずみの分布を図-7に示す。せん断スパン内でのひずみの分布はほぼ直線であり、応力集中に伴って生じる溶接位置付近での大きな引張ひずみは測定されていない。

4. 波浪に対する疲労安全性の検討

(1) 疲労寿命の算定方法

海洋構造物の疲労寿命の算定方法は、構造物を構成する各材料に対してマイナー則を用いて行う⁴⁾。その際、使用期間中に作用する波浪の波高と波数との関係が必要となる。今回は、酒田港で実測された波浪に基づいて得られた1年間の個別波の波高と波数との関係を用いる。この関係を図-8に示す。酒田港は日本海側に位置し、特に冬期に我が国でも比較的大きな波浪が長期間

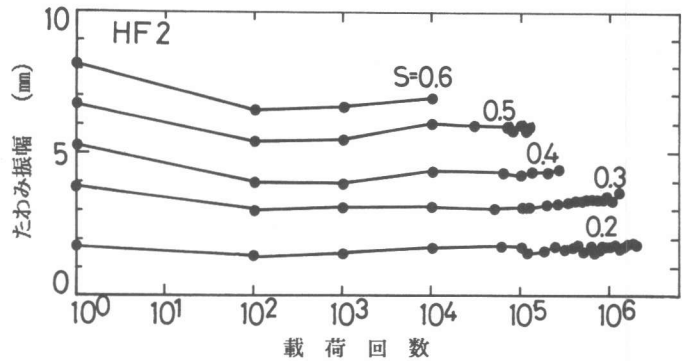


図-5 各荷重回数におけるはりのたわみ

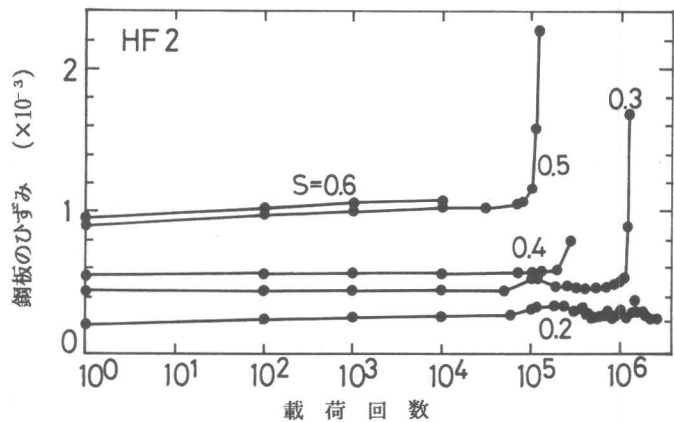


図-6 各荷重回数における鋼板のひずみ

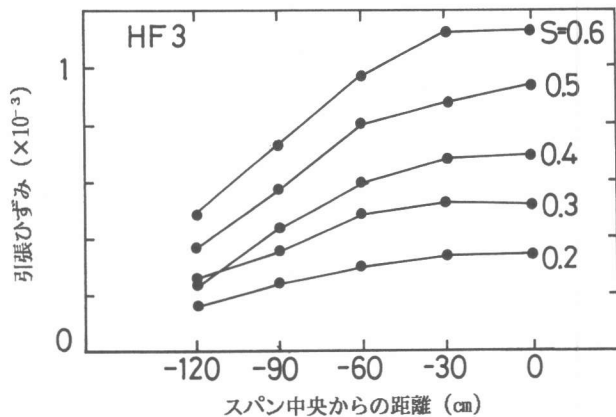


図-7 はり軸方向の鋼板のひずみ分布

にわたって来襲する港である。港湾構造物では一応50年程度を使用期間として考えているので、今回もこの期間での検討を行う。50年間にわたる波浪の観測結果はこれまでに得られていないので、図-8の結果をそのまま50倍してこの期間の波数とする。また、疲労に対する検討は、試験結果からみて引張側の鋼板に生じる応力度に対してのみ行う。

(2) 鋼板の疲労性状

形鋼を多数溶接した鋼板の疲労性状に関する情報は、これまで得られていない。そこで、実験で計測された破断位置近傍での鋼板のひずみ量と破断時の载荷回数から溶接鋼板のS-N関係を求めた。測定結果によれば、鋼板に生じたひずみは破断までほとんど一定であり、また溶接位置で特に大きなひずみは計測されていなかったため、今回はひずみの実測値に弾性係数を乗じた値を鋼板に発生した平均応力とみなして整理した。図-9に得られたS-N関係を示す。ここで、Sは平均応力を鋼板の引張強度で除した値である。最小自乗法による回帰直線は図中の実線で示されるが、非破壊確率が95%となる破線の関係を以下の検討で用いた。また、回帰直線の傾きの逆数は図中に示すように-5程度となり、溶接鋼材の引張疲労での傾きの逆数⁵⁾と比べて、ほぼ同程度か若干小さな値となった。

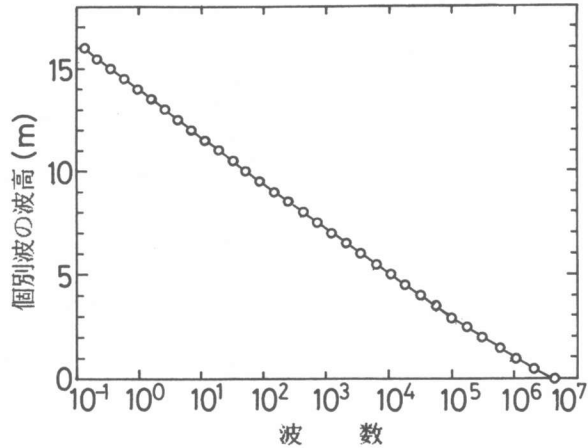


図-8 疲労の検討に用いた波高と波数の関係

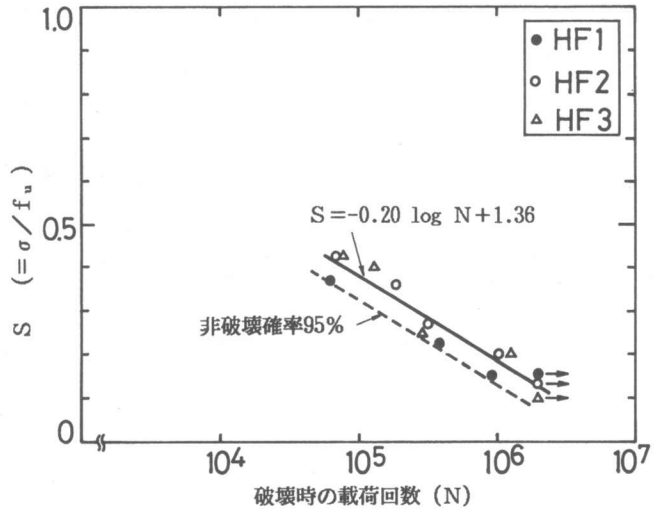


図-9 鋼板のS-N線図

表-3 実験結果から得られた鋼板の損傷度

波高 (m)	50年間の波数	応力比	N_f	損傷度
16~15	10	0.26	325700	0.0000
15~14	30	0.24	412500	0.0000
14~13	75	0.22	522300	0.0001
13~12	225	0.21	587800	0.0004
12~11	550	0.19	744380	0.0007
11~10	1600	0.17	942700	0.0017
10~9	4850	0.16	1060800	0.0046
9~8	13000	0.14	1343400	0.0097
8~7	39500	0.13	1511800	0.0261
7~6	105500	0.11	1914500	0.0551
6~5	358000	0.09	2000000	0.1790
$\Sigma = 0.28$				

(3) 疲労破壊に対する安全性の検討

図-8に示す波浪と図-9に示すS-N線図に基づき、50年間での鋼板の損傷度を求めた結果を表-3に示す。ここで、鋼板が疲労破壊に至る荷重の繰返し回数を N_f で示す。この際、試験に用いたのは、設計波浪（50年間での確率最高波高を有する波浪）が作用した際に鋼板の応力が許容応力度（ 1400kgf/cm^2 ）に達するとして設計されているものと仮定した。また、 N_f が200万回を越えた場合には、疲労破壊が起きないものとした。同表に示すように、損傷度の累計は約0.28となった。これまで述べたように鋼板溶接部の疲労強度がかなり小さいため、波高は小さいが波数の多い波に対して損傷度の相対割合が大きくなった。同じ終局強度を保有する鉄筋コンクリート部材と比較して、ハイブリッド部材の疲労強度は小さいと言える。しかし、疲労設計および試験結果に基づく方法によって得られた損傷度は1以下であり、海洋環境下で疲労破壊に対する一応の安全性は確認できた。

5. まとめ

本研究の範囲で得られた主要な結論は、以下のとおりである。

- 1) 鋼・コンクリート合成ばりの疲労破壊の形態は、鋼板とせん断補強鉄筋あるいはずれ止めの取付け位置付近での鋼板の破断であった。また今回の3種類のはりの構造間では、疲労特性に有意な差がなかった。
- 2) 繰返し荷重が200万回作用しても合成ばりに疲労破壊が生じない際の荷重の上限値は、はりの静的耐荷力の約20%となり、通常の鉄筋コンクリートはりと比べてかなり小さな値となった。
- 3) 合成ばりの疲労損傷は引張鋼板の溶接部近傍に集中し、ずれ止め、コンクリートおよび鉄筋にはほとんど損傷が生じなかった。
- 4) 疲労試験結果から、合成部材でのずれ止めを溶接した鋼板の疲労に関するS-N関係を求めると、傾きの逆数が-5程度となった。
- 5) 試験から得られた鋼板のS-N関係と波浪の実測結果を用いてマイナー則により計算した累積損傷度は1以下となり、疲労破壊に対する一応の安全性が確認された。

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。載荷試験では、千葉照男技官、白崎正浩技官ならびに研修生・西野邦男氏（若築建設）の協力を得ました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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、pp.531-536
- 3) 例えば、西林新蔵、井上正一、大谷公行：水中における鉄筋コンクリートはりの疲労性状、コンクリート工学年次論文報告集9-2、1987、pp.633-638
- 4) 運輸省港湾技術研究所、プレストレストコンクリート技術協会：PC海洋構造物の接合部での疲労特性、プレストレストコンクリート28-6、1986年11月、pp.11-17
- 5) 土木学会：国鉄建造物設計標準解説、鋼鉄道橋・鋼とコンクリートとの合成鉄道橋、1983