

波形鋼板ウェブ橋の横方向疲労特性に関する実験的研究

住友建設 (株)	土木本部	P C 設計部	正会員	○永元 直樹
	同	上	正会員	坂井 逸朗
	同	上	正会員	春日 昭夫
住友重機械工業 (株)	鉄構機器事業本部	技術開発部		小西 拓洋
住友建設 (株)	技術研究所		正会員	高木 康宏

1. はじめに

波形鋼板ウェブ橋を張出し施工にて建設する場合、波形鋼板どうしの継手構造としては、それらを重ね合わせ、すみ肉溶接にて接合する手法が取られている橋梁が近年多く建設されるようになってきた。このような接合を用いた場合、溶接施工性の関係から、上下床版付近の鋼板にはスカラップと呼ばれる切り欠きが必要となる。

一方、波形鋼板には高いせん断力が作用するとともに、上床版との接合部付近においては、交通荷重による橋軸周りの曲げモーメント（以下、首振りモーメントと称す）が作用する。このような応力下にスカラップを設けると、その周りに応力集中が発生するとともに、活荷重による応力変動が起こる。ここで、すみ肉溶接は疲労に対して、母材と同程度の性能は期待できないものと考えられるため、この部分の疲労特性について詳細な検討が必要であると考えられる。

このようなことから、本研究では応力集中が小さいと考えられるスカラップ形状を提案し、その応力集中に対する特性、疲労特性について、解析と実験から検討を行った。以下にその結果を報告する。

2. 提案スカラップ形状

今回提案するスカラップ形状を図-1に示す。このスカラップのコンセプトは以下の通りである。

- ①角を極力なくすとともに、スカラップの切り欠き形状を水平偏角 45 度とすることによって、スムーズな応力伝達を目指す。
- ②回し溶接部の溶接作業性を向上する。
- ③施工誤差調整部の重ね長の変化に対しても変わらない溶接作業性を確保する。

3. 検討項目

本検討は以下の3段階によって行った。なお、それぞれの詳細については、次章以降で記述する。

(1) 解析による応力状態の把握

立体FEM解析によって、実橋にせん断力が載荷された場合、活荷重が載荷された場合それぞれのスカラップ周りの応力状態を検討した。

(2) I 桁供試体によるせん断力に対する応力検討

実物大の波形鋼板にコンクリートの上下床版を設置し、I 桁供試体を製作した。その波形鋼板には、今回提案のスカラップをもった継手を設置した。この桁供試体に鉛直荷重を静的載荷することによって、せん断力に対するスカラップ周りの応力状態、疲労特性などを検討した。

(3) 箱桁断面の切り出し模型による、首振りモーメントに対する疲労特性の検討

実際の橋梁の箱桁断面を切り出した実験供試体を製作し、その中に今回提案のスカラップ形状をもつ波形

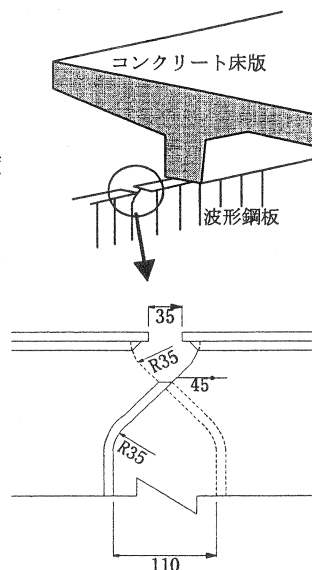


図-1 提案スカラップ形状

鋼板継手を設置した。その供試体に、実橋レベルの水平せん断力を波形鋼板に載荷し、その後、活荷重相当の鉛直荷重を床版に繰り返し載荷した。これらによって、実橋と同じく、水平せん断力が載荷された状態での活荷重による疲労特性の検討を行った。

4. 桁供試体での検討¹⁾

4. 1 検討概要

波形鋼板ウェブ橋は、既存の橋梁とは異なる力学的挙動を示す。この相違は、ウェブの形状に起因しており、ウェブのほとんどの部分には、直応力が発生せず、せん断応力のみが作用する。しかし、フランジ近傍のウェブにおいては、コンクリートとの合成により、せん断応力に加え、直応力も発生する。

このことを評価するために、コンクリート床版付き桁供試体の静的荷重実験を行った。図-2 に示す桁供試体の中央に 588kN(60tf) の荷重を載荷し、その時の実測応力と FEM 解析及び梁理論による計算応力を比較した。比較を行う場所は、X型スカラップ近傍とした。

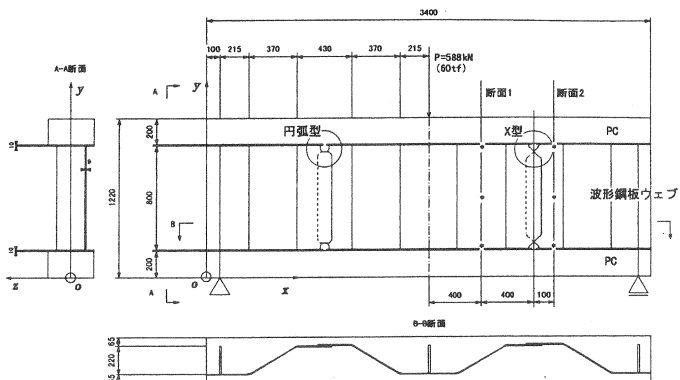


図-2 桁供試体概要図

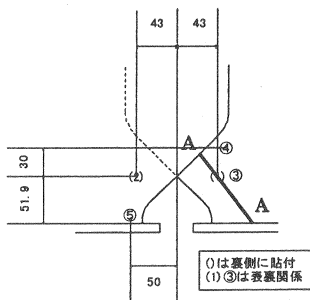


図-3 ゲージ張付位置

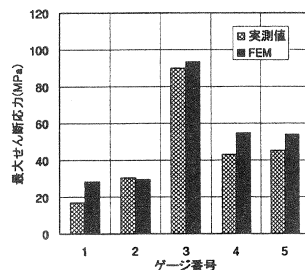


図-4 せん断応力度の比較

4. 2 試験供試体スカラップ近傍の応力と疲労強度予測

ウェブ下側の X 型スカラップ近傍の応力を FEM 解析と比較した。ゲージの貼付位置を図-3 に示し、図-4 に最大せん断応力の実測値と FEM 解析値の比較を示す。FEM 解析値はスカラップ近傍においても実測値を良く再現していることが分かる。従って、FEM 解析によるスカラップの近傍の応力分布を用いて疲労照査応力を決定する。

図-6 は FEM 解析により得られた最大主応力を溶接止端から図-3 A-A に沿ってプロットしたものである。これより、止端より 0.5t、1.5t (t: 板厚 9mm) の応力を外挿したホットスポット応力は、117(N/mm²)と算出される。また、最大主応力のピーク値から漸減し収束した値 80(N/mm²)をスカラップ付近の公称応力として採用した。これらの応力を評価応力として疲労照査を行う。

実験は繰り返し回数 420 万回間で行ったが、亀裂などの変化は現れていなかった。図-6 は「鋼構造物の疲労設計指針・同解説」²⁾ に則り、S-N 曲線上に今回の実験結果をプロットしたものである。なお、今回の構造は、同指針上のカバープレートすみ肉溶接で取り付けたディテール (1 > 300mm) と同等として、その値も

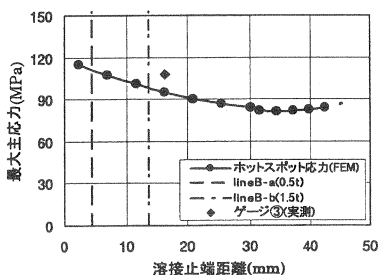


図-5 ホットスポット応力

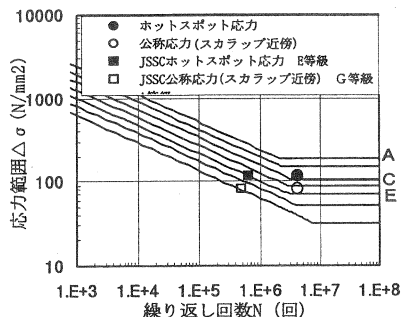


図-6 S-N 曲線(JSSC)

プロットした。これより、提案した X 型スカラップは少なくとも公称応力に対して E 等級を越える疲労強度を有するといえる。

5. 箱桁断面供試体での検討

5. 1 実験概要

実際の波形鋼板ウェブ橋を考える場合、波形鋼板は主にせん断力に抵抗する部材であるので、常に高いせん断力が作用しているものと考えられる。その状態で交通による鉛直変動荷重が作用する。すなわち、上床版との接合部に設置された波形鋼板のスカラップ部には、高い水平せん断力が常に作用した状態で、交通荷重による首振りモーメントが作用するものと考えられる。スカラップ周りの局部応力に着目した解析においても、水平せん断力によって発生する局部応力が約 $200(\text{N}/\text{mm}^2)$ 、交通荷重による局部応力が約 $50(\text{N}/\text{mm}^2)$ と、常時作用している水平せん断力の影響が、応力上、非常に大きいことがわかる (図-7、8)。

よって、この部分の疲労特性を検討する上でも、この水平せん断力の影響を加味することが重要と考えられるため、今回の研究では、水平せん断力が載荷した状態で、鉛直の繰り返し載荷を行うこととした。

具体的な実験手順としては、

- ・ step 1 : 交通荷重に相当する鉛直荷重の静的載荷を行い、その応力状態、変形を計測する。その後、荷重を除荷する。
- ・ step 2 : 実橋と同レベルの水平せん断力を載荷し、そのときの応力状態、変形を計測する。
- ・ step 3 : step 2 の状態を保ちつつ、さらに step 1 の鉛直荷重を載荷する。ここで、鉛直荷重、水平せん断力双方が載荷された状態での応力状態、変形を計測する。
- ・ step 4 : 水平せん断力を載荷した状態で鉛直荷重を繰り返し載荷する。

5. 2 供試体概要

実験は、山陽自動車道小犬丸川橋³⁾をもとに断面形状、荷重などを選定した。箱断面、波形鋼板の形状は、小犬丸川橋の標準断面と同一とし、寸法効果の影響を排除するために、実物大にて製作を行うこととした。張出し床版については、本実験結果には影響を及ぼさないと考えられるため、500mm に縮めた。また、橋軸方向の切り出し長は、波形鋼板の2波長分である 3.2m とした。なお、このように比較的短い長さ

で切り出し模型を作成し、上床版中央に鉛直載荷すると、上床版が連続版としての変形でなく、2次元的な変形を起こし、実橋の変形、応力状態を再現できなくなる可能性がある。このことを避けるため、供試体の両小口断面の上床版に水平リブを設置し、実橋の変形特性、応力状態を再現することとした。具体的には、

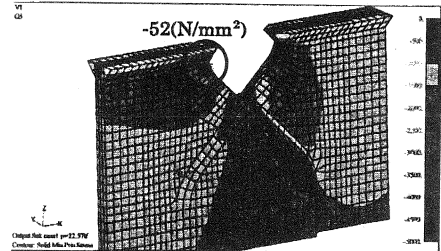


図-7 鉛直荷重による最小主応力

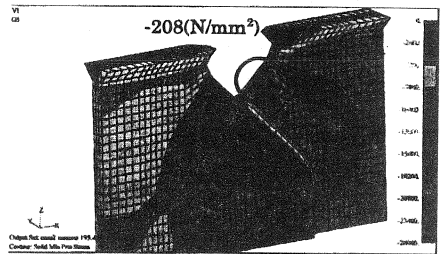


図-8 水平せん断力による最小主応力

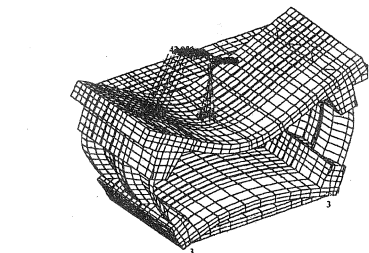


図-9 供試体の変形 (補強リブ無し)

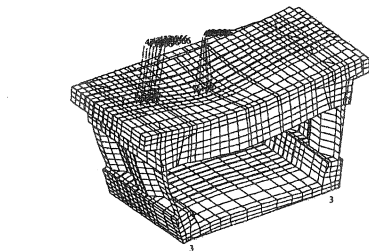


図-10 供試体の変形 (補強リブあり)

実橋と実験供試体を対象とした立体FEM解析を行い、実橋の変形特性、スカラップ周りの応力状態が再現できる供試体の水平リブの形状を検討した。その結果、リブ高さ814mm、厚さ150mmとした(図-9、10)。

実験供試体の形状を図-11に示す。ここで、使用材料は小犬丸川橋と同種のものを用いた(表-1)。

5. 3 載荷荷重

(1) 鉛直荷重

鉛直荷重は、実橋の車両走行状態を考慮して載荷荷重を決定することとした。すなわち、走行車線、追い越し車線に2台並列でトラックが走行することはまれであると考え、走行車線にT荷重相当のトラックが1台走行したときの荷重状態を再現することとした。

走行車線位置に衝撃係数を考慮したT荷重相当の鉛直荷重を載荷し、その際のスカラップ周りの応力を立体FEM解析により算出、その応力と同等の応力が発生するような、床版支間中央位置での鉛直荷重を同じく立体FEM解析により求めた。

(2) 水平せん断力

対象とした小犬丸川橋で最も波形鋼板に発生している水平せん断応力度が大きい位置に着目し、その水平せん断応力度を再現するように、実験供試体の載荷せん断力を選定した。

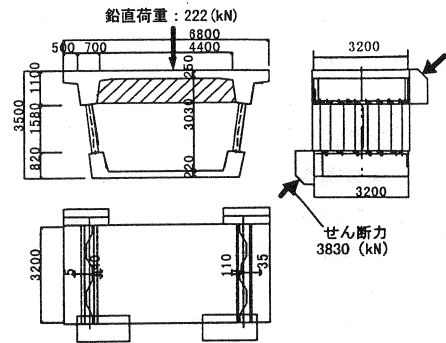


図-11 実験供試体概要図

表-1 使用材料一覧表

材料	種別
コンクリート	$\sigma_{ck}=50(\text{N/mm}^2)$
鉄筋	SD345
波形鋼板	SM490Y

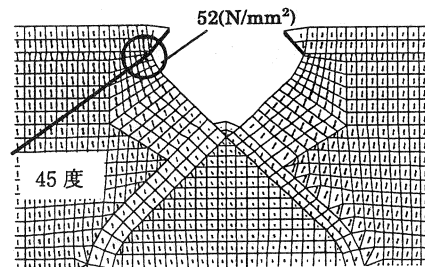


図-12 鉛直荷重による応力度

5. 4 静的載荷実験結果

(1) 鉛直載荷

鉛直載荷を載荷したときのスカラップ周りの応力状態(解析結果、桁内面)を図-12に示す。この図から、鉛直荷重を載荷したときは、鉛直方向の応力が卓越することがわかる。これは、首振りモーメントによって、波形鋼板に面外曲げが作用し、その結果、鉛直方向の応力が卓越しているものと考えられる。また、このとき、スカラップの上端付近に $50(\text{N/mm}^2)$ 程度の大きな局部応力が発生している。

この付近のホットスポット応力を算出するために、図中の実線上の鉛直応力分布を抽出した(図-13)。また、同じグラフ上に実験によって計測した応力度をプロットした。この図において、実験結果は解析結果と同様の傾向を示しており、解析により、本実験の応力状態は評価可能であると考えられる。また、解析結果より、上フランジとの溶接止端におけるホットスポット応力は、 $30(\text{N/mm}^2)$ と算出される。

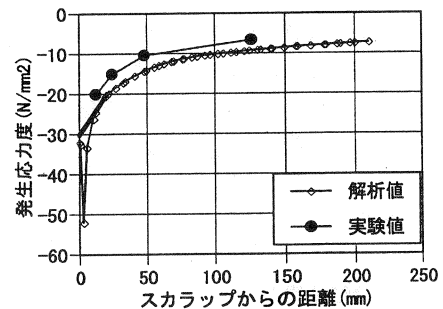


図-13 ホットスポット応力算出ライン上の応力

(2) 水平せん断力載荷

水平せん断力を載荷した状態をFEMによって解析し、(1)と同様にそのときのスカラップ周りの応力状態を図-14に示す。波形広範囲せん断力を載荷しているため、当然ながら、主応力の方向はほぼ斜め45

度方向である。また、波形鋼板同士が重なり合っている頂点の溶接止端部付近に大きな局部応力が発生している。鉛直荷重 (変動荷重) による応力集中箇所とは別の箇所であるが、その発生応力度は $208(\text{N/mm}^2)$ と、大きな値を示している。

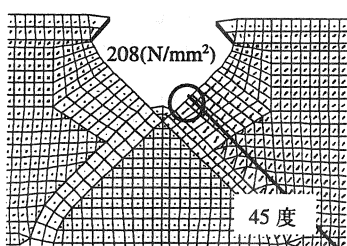


図-14 水平せん断力による応力度

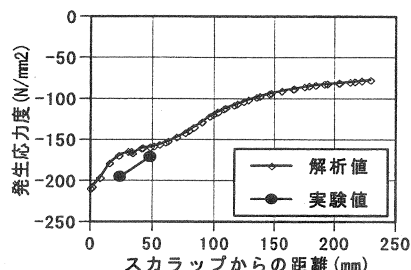


図-15 左図の実線上の直交応力度分布

(3) 海外実績橋の形状との比較

波形鋼板ウェブ橋の張出し施工実績としては、フランスのドーブル橋⁴⁾がある。この橋梁に用いられたスカラップ形状と、今回の形状との比較を行うため、ドータイプスカラップ形状について、上記と同様な解析を行った。その結果、形状が異なるため応力が集中する部分に違いはあるものの、その大きさにはほとんど差異は見受けられなかった (図-15,16)。

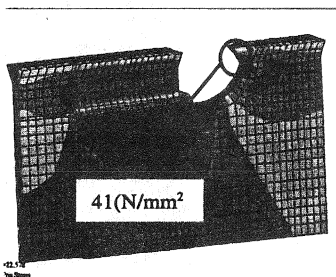


図-15 鉛直荷重作用時の最小主応力 (ドータイプ)

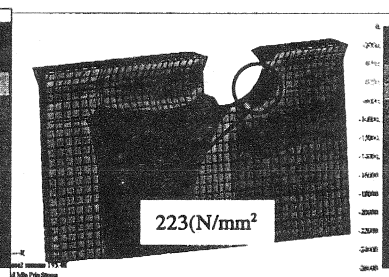


図-16 水平せん断力作用時の最小主応力 (ドータイプ)

5. 5 疲労実験結果

上記の水平せん断力を荷重した状態を保持し、その上で、鉛直荷重の繰り返し荷重を行った。なお、荷重の周期は、試験機的能力から 0.4 秒 (2.5Hz) とした。

試験中は、随時目視によるクラック等の発生調査を行うとともに、定期的に静的荷重を行い、応力状態、変位量の変化を調査した。これらの結果、200 万回までの繰り返し荷重によっては、スカラップ周りの応力状態の変化、変位量の増加などは一切見られなかった (図-17、18)。ここで、より詳細にスカラップ周りのクラック調査を行うために、浸透探傷試験、および磁粉探傷試験を行った (写真-1)。この結果においても、亀裂などは発見されず、200 万回荷重時点において、健全性を保っていると考えられる。

200 万回荷重後、鉛直荷重荷重を 2 倍の 444 (kN) とし、疲労実験を継続した。250 万回荷重時点において、亀裂は確認されず、主立った変位の増大、応力度の変状なども見受けられておらず、引き続き荷重実験を継続している (写真-2)。

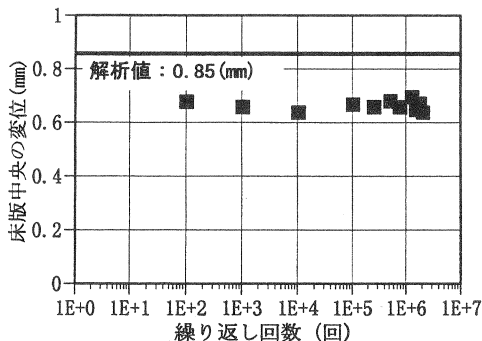


図-17 荷重位置での変位の推移

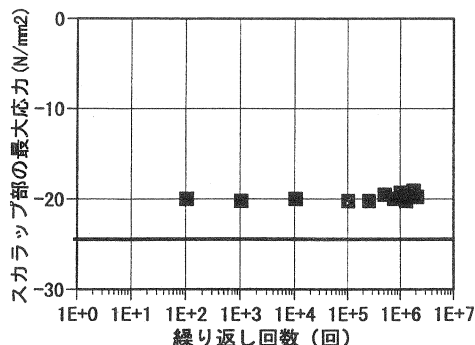


図-18 スカラップ周りの応力の推移

6. まとめ

本研究では、波形鋼板ウェブ橋における鋼板の接合構造に重ね合わせすみ肉溶接を用いるときの、端部スカラップ形状に対して、疲労の面から検討を行った。検討内容は、上下コンクリートフランジを持つ桁供試体によるせん断疲労の実験的検討と、実物大の箱桁供試体による首振りモーメントに対する実験的検討である。この結果、以下のことが明らかとなった。

- (1)コンクリートの上下床版を持つ桁供試体によって、せん断疲労実験を行った結果、今回提案した X 型スカラップは JSSC の指針では E 等級を越える疲労強度を有することが確認された。
- (2)実物大の箱桁供試体による静的荷重の載荷実験の結果、今回提案したスカラップ周りの局部応力は、大型車の走行による局部応力として、約 $50(\text{N}/\text{mm}^2)$ 、常時作用しているせん断力による局部応力として、約 $200(\text{N}/\text{mm}^2)$ が発生する。なお、この応力度は、海外の波形鋼板ウェブ橋で実績のあるスカラップ形状と比べて、ほとんど差はない。
- (3)今回提案したスカラップ周りのホットスポット応力は、解析結果より $30(\text{N}/\text{mm}^2)$ と考えられる。なお、実験の計測結果から、解析値は実用上問題ない程度の精度が確保されていることが確認された。
- (4)実物大の箱桁供試体の波形鋼板ウェブ部分に実橋と同レベルの水平せん断力を載荷し、その状態で交通荷重による首振りモーメントを繰り返し載荷した。その結果、200 万回までは何の変状も見受けられなかった。

現在、鉛直繰り返し載荷荷重を 2 倍として実験を続行中であり、今後、今回提案したスカラップ形状の疲労強度を明らかにする予定である。



写真-1 磁粉探傷試験状況

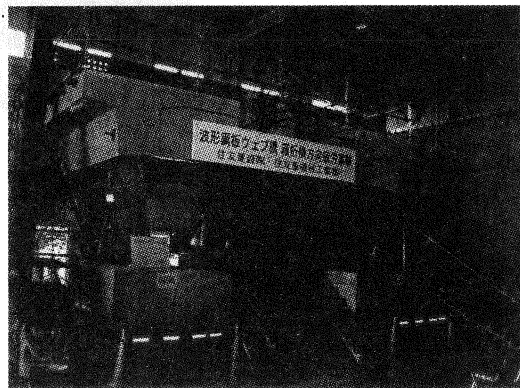


写真-2 実物大横方向疲労実験状況

参考文献

- 1) 江崎慶治、小西拓洋、坂井逸朗、武内隆文：「波形鋼板ウェブ橋継手部 X 型スカラップ部の疲労強度」、土木学会第 56 回年次学術講演会概要集 (投稿中)
- 2) (社) 日本鋼構造協会：「鋼構造物の疲労設計指針・同解説」、1993 年 4 月
- 3) 藤岡正男、中菡明広、春日昭夫、永元直樹：「小犬丸川橋 (波形鋼板ウェブ橋) の設計」、第 10 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、pp. 425~430、平成 12 年 10 月
- 4) Jacques Combault, Jean-Daniel Lebon and Gordon Pei : Box-Girder Using Corrugated Steel Webs and Balanced Cantilever Construction, FIP Symposium '93 Kyoto Japan, pp.417-424, 1993 Oct.