

川崎製鉄株式会社 正員 石渡正夫 田中康浩  
同 上 ○正員 行友 浩 川島義克

## 1. まえがき

川崎製鉄千葉製鉄所構内に新增設される西工場と現在の東工場を結ぶ連絡橋として鉄道橋が建設されている。本橋梁は橋長39.2mのプレートガーダー形式単純桁橋（2径間、複線）である。この主桁材として川崎製鉄の80Kg/mm<sup>2</sup>級調質高張力鋼 RIVER ACE K-0 が使用された。これまで、80Kg/mm<sup>2</sup>級鋼材が橋梁に使用された例は少なく、わが国では京葉道路の花輪橋（RIVER ACE K-0 使用）がその唯一の例である。鉄道橋のように繰返し応力を受ける構造物の設計には、構造材料の疲労特性を十分考慮する必要があるが、80Kg/mm<sup>2</sup>級鋼材の疲労に関する資料は少なく、今回、その確性のための一連の疲労試験を行うことになった。プレートガーダーの溶接部を模型的にとりだした各試験片（体）による圧縮疲労試験および引張疲労試験、小型プレートガーダーの曲げ疲労試験を行なった。

また試験結果を考察するにあたって各試験片（体）と同一形状の試験片（体）に対する残留応力を測定した。

## 2. 供試材および試験片（体）

表-1 供試材の化学成分および機械的性質

| 板厚<br>mm | C    | Si   | Mn   | P     | S     | Cu   | Ni   | Cr   | Mo   | V     | B     | Ceq  | 引張試験                         |                              |              |                | 曲げ試験                  |                       | 衝撃試験<br>E-59J<br>JIS |
|----------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|-------|-------|------|------------------------------|------------------------------|--------------|----------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
|          |      |      |      |       |       |      |      |      |      |       |       |      | 引張強さ<br>σ <sub>b</sub> (MPa) | 引張強さ<br>σ <sub>t</sub> (MPa) | 伸び率<br>ε (%) | 断面収縮率<br>Z (%) | 180° R <sub>15T</sub> | 180° R <sub>15T</sub> |                      |
| 6        | 0.10 | 0.30 | 0.85 | 0.007 | 0.010 | 0.19 | 0.78 | 0.46 | 0.33 | 0.035 | 0.004 | 0.45 | 79                           | 82                           | 20           | 良              | 良                     | 13.8                  | 13.8                 |
| 16       | 0.10 | 0.30 | 0.85 | 0.007 | 0.010 | 0.19 | 0.78 | 0.46 | 0.33 | 0.035 | 0.004 | 0.45 | 80                           | 84                           | 32           | 良              | 良                     | 15.6                  | 15.6                 |

本研究において使用した鋼材は川崎製鉄の80Kg/mm<sup>2</sup>級調質高張力鋼 RIVER ACE K-0 で、板厚

16mmと6mmのショットブラスト後の実用材である。その化学成分および機械的性質を表-1に示す。

- i) A型試験片—— プレートガーダーのウェブと下フランジの隅肉溶接部を想定した縦ビード突合せ溶接試験片である。溶接ビードの余盛有・無、溶込み完全・不完全の4種の試験片がある。
  - ii) B型試験片—— プレートガーダーの補剛材溶接部を想定し、試験片の載荷方向に対して直角方向、45°方向、水平方向に板厚6mm、巾40mmのリブを溶接したリブ付疲労試験片である。
  - iii) C型試験片—— プレートガーダーのウェブと上フランジの隅肉溶接部を想定した縦十字隅肉溶接試験片である。溶接ビードの溶込み完全・不完全の2種の試験片がある。
  - iv) D型試験体—— 支点および載荷点に鉛直補剛材、圧縮側ウェブに水平補剛材をもつ支間1.0mの小型プレートガーダーで、圧縮側フランジ断面を引張側より小さくした断面形状である。
- i)~iii)の試験片の溶接に使用した溶接棒はいずれも川崎製鉄の低水素系溶接棒 KS-116, 3.2~5mmφであり、A型試験片の余盛の削除は全面5S程度になるように応力方向の機械研磨をほどこした。一部の試験は溶接のため多少曲がりを生じたので油圧式の矯正機で修正したが、矯正ひずみ量は試験片全長に対し、0.5~1.0mm程度であつた。試験片形状を図-1に示す。

## 3. 試験方法

- i) 試験機は東京機械製ローゼンハウゼン型バルスーター付60t/40t万能疲労試験機で、繰返し

試験速度は

666 サイクル/分

である。ii) A型およびB型試験片に対して片振り引張疲労試験を行なう。iii) C型試験片に対して片振り圧縮

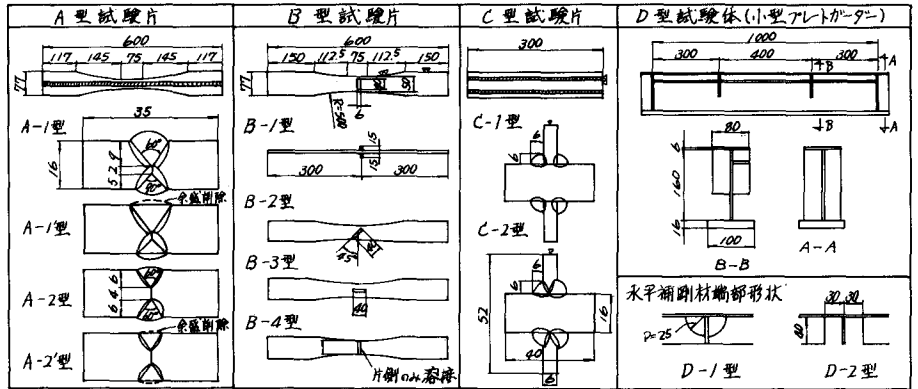


図-1 試験片(体)の形状

疲労試験を行なう。試験片両端部は面タッチで載荷する。iv) 試験片平行部の板厚面にはひずみゲージを貼付して荷重応力の検出および偏心調整を行なつた。v) D型試験体については鉛直補剛材直上のフランジに載荷板を置き、圧縮フランジ上縁の応力を最大約3200  $\text{Kg/cm}^2$  になるように2~26 tの2点載荷による片振り曲げ疲労試験を行なつた。なお試験体中央および載荷点付近には1軸および3軸ゲージを貼付して繰返し載荷の途中で試験機を止め、最大26 tの静的載荷試験を行なつて亀裂の進行に伴う断面内応力分布の変化を調べた。vi) A型試験片およびD型試験体については静的引張試験あるいは静的耐力試験を行ない、A型、C型試験片およびD型試験体については溶接によつて生じる残留応力をひずみゲージを用いて測定した。

#### 4. 試験結果

##### i) 縦ビード突合せ溶接試験片 (A型試験片)

片振り引張疲労試験結果をS-N曲線 (図-2) に示す。不完全溶込み余盛付試験片 (A-2型) の200万回疲労限度は17.8  $\text{Kg/mm}^2$  で、亀裂の発生は余盛部とルート部の双方にみられた。この試験片の余盛を削除した試験片 (A-2型) では主としてルート部からの亀裂が発生し、疲労強度はほとんど改善されない。完全溶込み余盛付試験片 (A-1型) は余盛部から亀裂が発生し、疲労限度は20.0  $\text{Kg/mm}^2$  であつた。A-2型、A-2'型よりわずかに高い程度であるが、この余盛を削除すると疲労限度は28.0  $\text{Kg/mm}^2$  となり、格段に改善された。

##### ii) リブ付疲労試験片 (B型試験片)

片振り引張試験結果をS-N曲線 (図-3) に示す。亀裂発生位置は全て余盛止端部である。リブ全周を溶接したものでは止端部での応力集中度は応力直角方向 $<45^\circ$ 方向 $<$ 応力方向の順に大きくなると予想されたが、疲労限度は $45^\circ$ 方向10.6  $\text{Kg/mm}^2$ で、むしろ応力直角方向9.6  $\text{Kg/mm}^2$ より大きめに現われており、その差はあまり顕著でない。しかし応力方向リブ付試験片では黒皮のままの母材の疲労限度4.3  $\text{Kg/mm}^2$ に対し、5.5  $\text{Kg/mm}^2$ という低い疲労限度しか得られなかつた。またリブの溶接は片側溶接でも両側溶接と同等の結果が得られた。

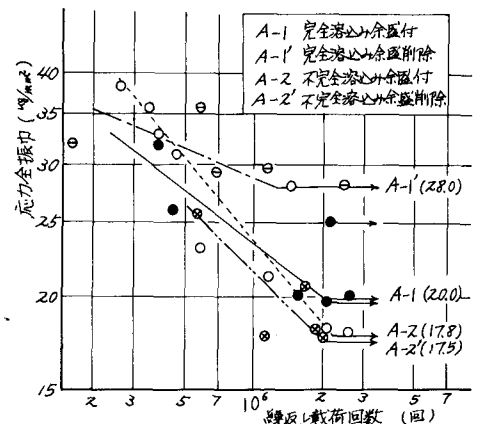


図-2 A型試験片のS-N曲線

iii) 縦十字隅肉溶接試験片 (C型試験片)

表-2に片振り圧縮疲労試験結果を示すが、ほとんどの試験片の応力直角方向の疲労亀裂が無数に検出された。亀裂発生時点は明確ではないが、200万回繰返し疲労のちカラーチェックによつて亀裂を検出した。開先なしの隅肉試験片(C-1型)に対して応力全振巾-26.5  $\text{kg/mm}^2$ では亀裂が検出されなかつたが、開先付の試験片(C-2型)では応力全振巾-16.9  $\text{kg/mm}^2$ まで低下させても亀裂が発生した。圧縮疲労では亀裂は試験片全長にわたつてボンド部よりそれぞれ独立に発生し、試験片断面内の端部で停留している。なお残留応力を焼鈍した場合、応力振巾40  $\text{kg/mm}^2$ でも全く亀裂は生じなかつた。A型、C型、D型試験片(体)の残留応力測定結果を図-5に示す。

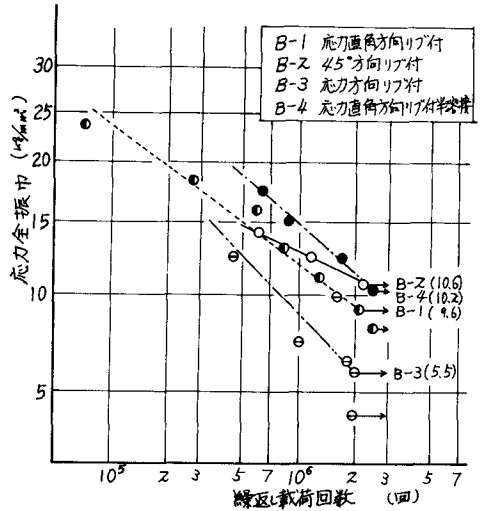


図-3 B型試験片のS-N曲線

iv) 小型プレートガーダー試験体 (D型試験体)

図-4に曲げ疲労試験の疲労亀裂状況を示すが、亀裂発生点は全て補剛材溶接ビード止端部で、D-1型では最初45万回で水平・鉛直補剛材が剝離すると同時に水平補剛材止端部に亀裂が発生した。D-2型では14万回で最初に水平補剛材止端部に亀裂が発生した。亀裂の発生、進行は全て圧縮断面内であつた。

表-2 C型試験片の圧縮疲労試験結果

| 試験片   | 圧縮疲労試験応力            |                     |                     |                      | 応力振巾 $\times 10^2$ | 繰返し回数 $\times 10^4$ | 亀裂発生 |
|-------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|--------------------|---------------------|------|
|       | 最小 $\text{kg/mm}^2$ | 最大 $\text{kg/mm}^2$ | 平均 $\text{kg/mm}^2$ | 全振巾 $\text{kg/mm}^2$ |                    |                     |      |
| C-1-1 | -37.2               | -4.2                | -20.7               | -33.0                | 201                | 201                 | 有    |
| 2     | -37.0               | -4.5                | -20.8               | -32.5                | 206                | 206                 | 有    |
| 3     | -30.0               | -4.0                | -17.0               | -26.0                | 207                | 207                 | 無    |
| C-1SR | -40.6               | -5.4                | -23.9               | -35.2                | 233                | 233                 | 無    |
| C-2-1 | -36.5               | -4.5                | -20.5               | -32.0                | 237                | 237                 | 有    |
| 2     | -36.8               | -4.6                | -20.7               | -32.2                | 200                | 200                 | 有    |
| 3     | -29.2               | -4.2                | -15.7               | -25.0                | 200                | 200                 | 有    |
| 4     | -19.9               | -3.0                | -11.5               | -16.9                | 207                | 207                 | 有    |
| C-2SR | -39.2               | -5.8                | -22.5               | -33.4                | 259                | 259                 | 無    |

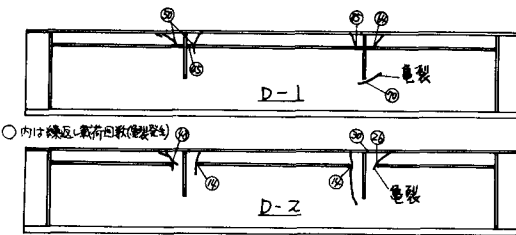


図-4 小型プレートガーダーの疲労亀裂状況

5. 考 察

- (1) 高張力鋼は切欠感受性が高く、応力集中の生じる溶接ビードの余盛部、ルート部が疲労強度に支配的となる。余盛部よりもルート部の影響が大きい、それらを除去すれば(A-1型試験片)一般鋼材に比べてかなり高い疲労強度が得られる。
- (2) 作用応力と残留応力についてそのまま重ねあわせが可能であるとすれば、図-6の(a)のように溶接によ

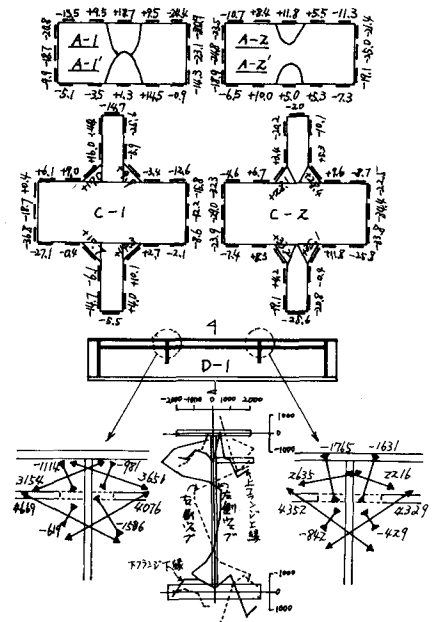


図-5 試験片(体)の残留応力

る残留応力と繰返し応力が同符号の場合、その和が部材の降伏応力に達しない範囲では残留応力が疲労強度に与える影響は少ない。従つて部材の疲労に対して引張残留応力が影響するのは200万回疲労限度でなく、むしろ繰返し応力回数の少ない時点である。

(2) 図-6の(b)のように異符号の場合、例えばC型試験片のように引張残留応力(C-1型最大17kg/mm<sup>2</sup>、C-2型最大35kg/mm<sup>2</sup>)が存在する部材に繰返し圧縮応力が作用すれば、その部材は繰返し引張応力あるいは両振り応力を受けることにな

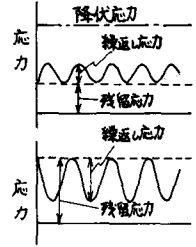


図-6 応力図

り、引張疲労亀裂を生じると考えられる。(表-3を参照) 焼鈍材に亀裂が発生しなかつたこともこれを裏付けている。しかし載荷応力が圧縮であるから亀裂の発生による有効断面の減少はなく、部材が破断することはない。しかも亀裂は断面の端部の圧縮残留応力領域には侵入せず、停留するので、圧縮のみを受ける部材では圧縮疲労は問題ではないと考えられる。

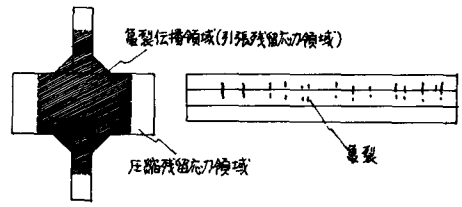


図-7 C型試験片の亀裂発生状況

(3) プレートガーダーの補剛材溶接止端部から発生した亀裂は圧縮断面内のウェブを進行し、フランジとウェブの隅肉溶接部あたりで停留する。これを図-5の残留応力分布および残留応力の主応力方向から考察すると(2)と同様の理由で説明できる。すなわち亀裂進行付近では載荷による繰返し圧縮応力に近い引張残留応力が存在し、その引張残留応力の主応力方向に直角に亀裂が進行した。

(4) 上記の圧縮疲労について疲労限度線図を用いて考察する。図-8はA-1型試験片の疲労限度と溶接部の残留応力をもとに作製した縦ビード突合せ溶接試験片での疲労限度線図である。この図より疲労破壊しない領域OT Aに対してC型試験片での試験条件はC-1-3あるいはC-2-4で亀裂発生に対する下限応力近傍にあつたことが推定される。

表-3 C型試験片の受けている実疲労応力

| 試験片    | 圧縮疲労試験条件 |      |       |    | 残留応力<br>kg/mm <sup>2</sup> | 実疲労応力 |       |      |    | 亀裂発生 |
|--------|----------|------|-------|----|----------------------------|-------|-------|------|----|------|
|        | 最小       | 最大   | 平均    | 全幅 |                            | 最大    | 最小    | 平均   | 全幅 |      |
| C-1-1  | -37.2    | -4.2 | -33.0 |    | +17.0                      | +12.8 | -20.2 | 33.0 |    | 有    |
| 2      | -37.0    | -4.5 | -32.5 |    |                            | +12.5 | -20.0 | 32.5 |    | 有    |
| 3      | -30.0    | -4.0 | -26.5 |    |                            | +13.0 | -13.0 | 26.0 |    | 無    |
| C-1 SR | -40.6    | -5.4 | -35.2 |    | -                          | -     | -     | -    |    | 無    |
| C-2-1  | -36.5    | -4.5 | -32.5 |    | +35.1                      | +30.6 | -1.4  | 32.0 |    | 有    |
| 2      | -36.8    | -4.6 | -32.2 |    |                            | +30.5 | -1.7  | 32.2 |    | 有    |
| 3      | -27.2    | -4.2 | -25.0 |    |                            | +30.9 | +5.9  | 25.0 |    | 有    |
| 4      | -19.9    | -3.0 | -16.9 |    |                            | +32.1 | +15.2 | 16.9 |    | 有    |
| C-ZSR  | -39.2    | -5.8 | -33.4 |    | -                          | -     | -     | -    |    | 無    |

#### 6. むすび

本研究では試験機の容量から試験片(b)が小さく、疲労強度に与える残留応力の影響が過大に評価されがちであるが、定性的に引張残留応力は引張疲労よりむしろ圧縮疲労に影響することが確認された。しかし疲労に大きく影響するのはやはり欠陥による応力集中であり、欠陥を除去すれば80kg/mm<sup>2</sup>鋼材の疲労強度をかなり向上できる。おわりにあつて本研究を終始ご指導いただいた本州四国連絡橋公団 田島次長に心から深謝申し上げます。

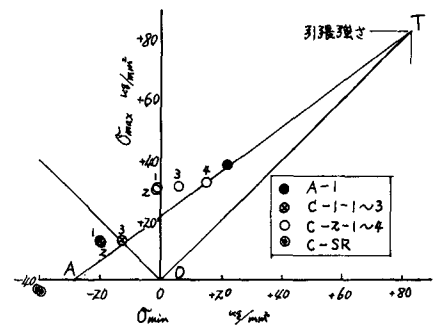


図-8 疲労限度線図