

## 鋼床版とRC床版接合部の疲労強度

FATIGUE STRENGTH OF JOINTS BETWEEN ORTHOTROPIC STEEL DECK AND RC SLAB

山田健太郎\*・高橋章\*\*・酒井吉永\*\*\*・横山正則\*\*\*\*・井ヶ瀬良則\*\*\*\*

By Kentaro YAMADA, Akira TAKAHASHI, Yoshinaga SAKAI,  
Masanori YOKOYAMA and Yoshinori IGASE

When RC slab is used as a counter weight on relatively short side spans of cable stayed bridge, the detail should be carefully selected to obtain smooth transition of stresses from orthotropic steel deck to RC slab. A detail with cranked steel deck and trough ribs is one of the solutions to achieve such smoothness and to avoid stress concentration. A series of fatigue tests of such details were carried out. The effect of miss-alignments at the joints is also investigated by stress analysis and by analysis of fatigue crack propagation behavior using fracture mechanics.

*Key Words : fatigue, orthotropic steel deck, trough ribs, miss-alignment*

## 1. まえがき

鋼床版はコンクリート床版と比べて重量が軽いので、吊橋、斜張橋、箱桁橋のような長スパン橋梁に用いられる。しかしながら、鋼床版は、舗装を介して輪荷重を直接支えるため作用応力範囲が大きくなり、疲労に対する照査は不可欠である<sup>1)</sup>。また、過去の疲労損傷事例によると、縦リブと端横桁の交差部、縦リブと横リブおよびダイアフラムとの交差部、デッキプレートと横リブおよびダイアフラムとの溶接部、縦リブ現場溶接部などで損傷が起きている<sup>2)3)</sup>。特に縦リブがダイアフラムと交差する部分では、縦リブを横リブに貫通させて縦リブの連続性を保ち、横リブの断面欠損分は桁高を大きくするか、腹板厚を大きくするのが一般的である。しかしながら、端横桁やトラフリブからバルブプレートに移行する部分では、縦リブを横リブ腹板に突合せ溶接する。この場合、溶接部は荷重伝達型の継手になる。このような交差部で縦リブが不連続となる箇所は、溶接施工が難しく、また製作誤差として目違いが生じる可能性もある。本研究では、この縦リブとダイアフラムの交差部に着目して、実験と解析を行った。

側径間が中央径間に比べて短い場合、端橋脚の負反力を低減するため、側径間をPC桁にしたり、カウンターウェイトを載せることがある<sup>4)5)</sup>。例えば名古屋港に建設中の名港東大橋（仮称）では、径間比が1:2.8:1と側径間が比較的小さいため、端橋脚の負反力低減対策として、側径間にRC床版を用いる。そのため、図1に示すような鋼床版とRC床版の接合部の構造を塔支点近傍に設ける案が提案された。この構造は、デッキプレートと縦リブに角度をつけて連続化させて、上フランジの応力がスムーズに流れるようにしたものであ

\* Ph.D 名古屋大学教授 工学部土木工学科 (〒464-01 名古屋市千種区不老町)

\*\* 工修 東京電力(株) (〒401 山梨県大月市笹子町黒野田326番地1号) (前名大大学院)

\*\*\* 工修 名古屋大学大学院 トビー工業(株)第一技術研究所

\*\*\*\* JH日本道路公団 伊勢湾岸道路工事事務所 (〒459 名古屋市緑区大高町東山16-4-3)

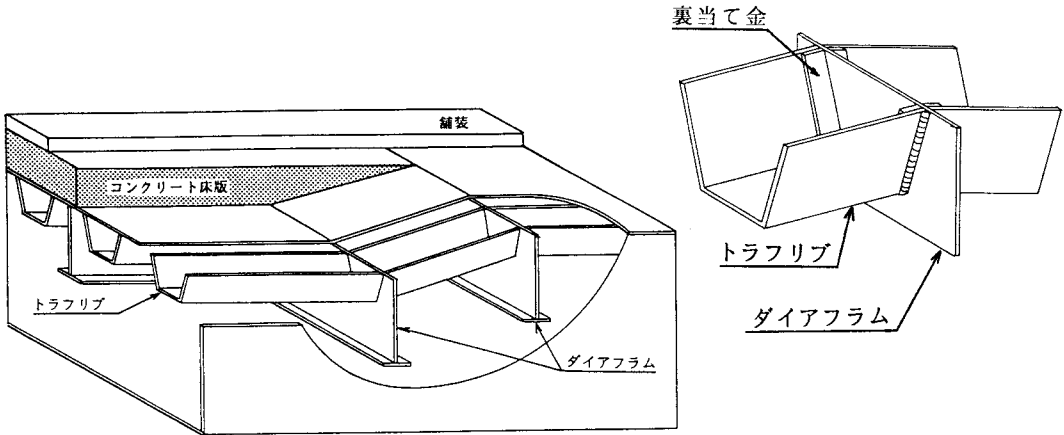


図 1 鋼床版の角折れ部の概念図とトラフリブの突合せ溶接

る。この部分では、ダイアフラムを境としてトラフリブが折れるため、応力の流れを確認するとともに、溶接施工上の問題をクリアにし、さらに、疲労に対する照査を行う必要がある。

そこで、本研究では、この接合部の原寸大部分モデルを用いた疲労試験を行って疲労強度を求めた。また、有限要素解析により接合部近傍の応力分布を把握し、トラフリブとダイアフラムの溶接部を対象に破壊力学を用いた疲労寿命解析を行い、接合部の疲労損傷評価を行った。初期不整として、鋼床版の折れ角の有無、トラフリブの目違い、ダイアフラムの板厚が疲労強度に及ぼす影響を検討した。

## 2. 疲労試験

### (1) 試験体および試験方法

疲労試験体は、図 2 に示すように、鋼床版と RC 床版接合部を縦リブ 1 本、ダイアフラム 2 区間分をモデル化したもので、使用鋼材はすべて SS400 である。縦リブは上幅 320mm、高さ 240mm、板厚 6mm のトラフリブを用い、デッキプレートは板厚 12mm、幅 660mm である。トラフリブとダイアフラムの接合は、裏当て金を用いたレ形開先グループ溶接で行い、その他はすみ肉溶接した。試験体は、表 1 に示すように、デッキプレートの折れ角、ダイアフラムの板厚  $t_d$ 、トラフリブ上下方向の目違い  $e$  によって、A1、A2、B1、B2、B3、B4 の 6 種類、合計 15 体製作した。試験体 A1、A2 は、デッキプレートに折れ角がなく、A1 はトラフリブをダイアフラムに突合せ溶接したもので、試験体 A2 はダイアフラムを切り欠いてトラフリブを連続させたものである。試験体 B1～B4 は、 $\theta = 6.4^\circ$  の折れ角がある。折れ角のある側を斜部、ない側を平行部と呼ぶこととする。試験体 B1 と B3 は、ダイアフラムの板厚を  $t_d = 9\text{mm}$  とし、試験体 B2 と B4 は、 $t_d = 19\text{mm}$  とした。試験体 B1 では、デッキプレートに折れ角があるために、ダイアフラムの両側でトラフリブの上下方向に  $e = +2\text{mm}$  の目違いが生じる。試験体 B3 と B4 は、製作誤差を想定して、目標  $e = -4\text{mm}$  の目違いを導入した。目違いは、折れ角のついた側斜部のトラフリブが下側にずれた場合を正とする。

疲労試験は図 3 に示すように、トラフリブとダイアフラムの交差部で正の等曲げが生じるように 4 点曲げ载荷した。荷重は、下限荷重を 3.0tonf、応力比を 0.13～0.2 とし、1.5～2.0Hz の正弦波とし、サーボ式疲労試験機 (容量:35tonf) を用いて载荷した。応力範囲  $\sigma_r$  は、トラフリブ下縁の応力で表し、試験体 B1 のみ  $\sigma_r = 117.6, 156.8, 196.0\text{MPa}$  になるように载荷した。他の試験体は、すべて  $\sigma_r = 117.6\text{MPa}$  で载荷して比較した。なお、これらのトラフリブ下縁の応力は、ひずみゲージによる計測や後述する有限要素法による値でもほぼ同じ値を示した。また、疲労き裂の形状および進展状況を観察するため、ビーチマークを導入した。

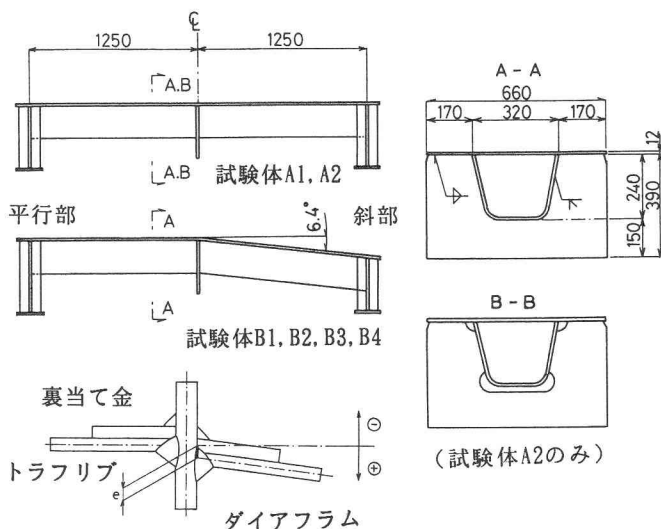


図2 疲労試験に用いた試験体

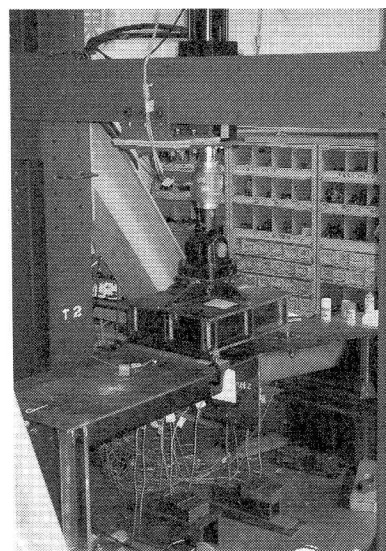


図3 試験体の載荷方法

表1 疲労試験体と疲労試験結果のまとめ

| Specimens | Thickness of Dia (mm) | Miss-alignment e (mm) | e <sub>r</sub> (mm) | e <sub>r</sub> -e <sub>t</sub> (mm) | Stress range σ <sub>r</sub> (MPa) | Stress ratio R | N <sub>c</sub> * (×10 <sup>3</sup> ) | N <sub>f</sub> (×10 <sup>3</sup> ) | N <sub>c</sub> * / N <sub>f</sub> | Crack initiation point |
|-----------|-----------------------|-----------------------|---------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|----------------|--------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------|
| A1-1      | 9                     | 0                     | +1.4                | 0.23                                | 117.6                             | 0.20           | 827                                  | 834                                | 0.99                              | H, B, R (170)          |
| A1-2      | 9                     | 0                     | -0.8                | 0.13                                | 117.6                             | 0.20           | 1008                                 | 1045                               | 0.96                              | S, B, R (45)           |
| A2-1      | 9                     | 0                     | 0                   | 0                                   | 117.6                             | 0.20           | -                                    | >2000                              |                                   |                        |
| B1-1      | 9                     | +2                    | -                   | -                                   | 117.6                             | 0.20           | 717                                  | 888                                | 0.81                              | S, B, T (110)          |
| B1-2      | 9                     | +2                    | +2.8                | 0.13                                | 117.6                             | 0.20           | 1293                                 | 1301                               | 0.99                              | S, B&C, R&T (160)      |
| B1-3      | 9                     | +2                    | +3.5                | 0.25                                | 196.0                             | 0.13           | 148                                  | 154                                | 0.96                              | H, C, T (135)          |
| B1-4      | 9                     | +2                    | +5.0                | 0.50                                | 156.8                             | 0.16           | 448                                  | 480                                | 0.93                              | H, B&C, T (25)         |
| B1-5      | 9                     | +2                    | 0.0                 | 0.33                                | 156.8                             | 0.16           | 392                                  | 413                                | 0.95                              | S, B, T (110)          |
| B1-6      | 9                     | +2                    | +3.4                | 0.23                                | 196.0                             | 0.13           | 154                                  | 221                                | 0.70                              | H, B, T (35)           |
| B2-1      | 19                    | +2                    | -0.6                | 0.43                                | 117.6                             | 0.20           | 1199                                 | 1203                               | 0.99                              | H, B, T (60)           |
| B2-2      | 19                    | +2                    | +2.5                | 0.08                                | 117.6                             | 0.20           | 834                                  | 874                                | 0.95                              | S, B, T (125)          |
| B3-1      | 9                     | -4                    | -5.4                | 0.23                                | 117.6                             | 0.20           | 688                                  | 780                                | 0.88                              | S, B, T (160)          |
| B3-2      | 9                     | -4                    | -4.1                | 0.02                                | 117.6                             | 0.20           | 623                                  | 717                                | 0.87                              | S, B, T (35)           |
| B4-1      | 19                    | -4                    | -3.0                | 0.17                                | 117.6                             | 0.20           | 1166                                 | 1189                               | 0.98                              | H, B, R (100)          |
| B4-2      | 19                    | -4                    | +3.8                | 0.03                                | 117.6                             | 0.20           | 1074                                 | 1112                               | 0.97                              | S&H, B, R&T (20)       |

e: 目違い (目標値)

e<sub>r</sub>: 目違い (実測値)

t<sub>t</sub>: トラフリブの板厚

S: 斜部側

H: 平行部

B: トラフリブの下面

C: トラフリブのR部

T: トラフリブ側溶接止端部

R: 溶接ルート部

( ): 発生き裂長(mm)

## (2) 疲労試験の結果

疲労試験の結果を表1にまとめる。疲労き裂はすべてトラフリブのグループ溶接部に発生した。表1の疲労き裂発生位置は、Sが斜部側、Hは平行部側であることを、またBはトラフリブの下面、CはR部であることを示す。TおよびRは、き裂発生箇所がそれぞれトラフリブ側溶接止端部もしくは溶接ルート部であることを示している。疲労き裂発生位置は、折れ角を有するBシリーズの12体中11体が、トラフリブ下面中央付近のトラフリブ側止端部であり、折れ角のないA1では、2体とも、トラフリブ下面中央付近の溶接ルート部であった。

試験体A1-2の破面を図4(a)に示す。図中a、b、cを記した線はビーチマークで、それぞれ100.8万、102.5万、103.2万回時のものである。き裂がトラフリブ下面中央付近の溶接ルート部から発生し、作用応力に垂直

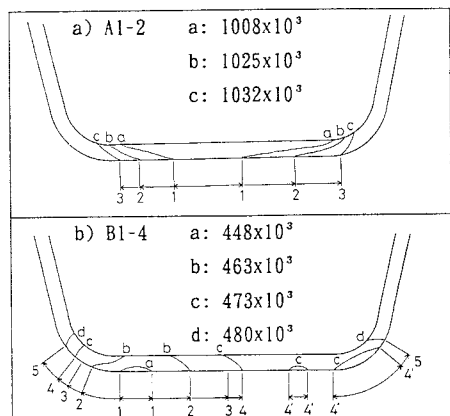


図4 疲労破面

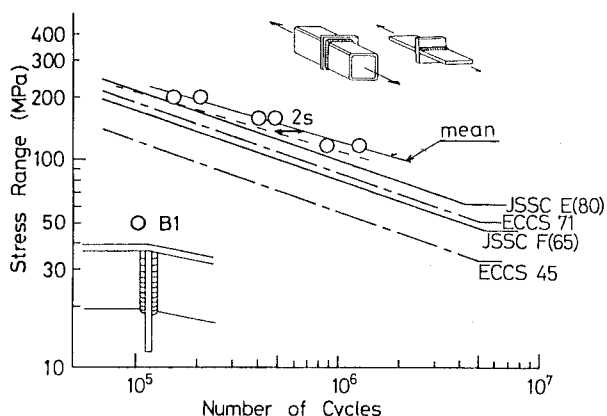


図5 疲労試験体及び各設計  $S-N$  線図との比較

にトラフリブ下面を貫通した後、両側に進展している。図4(b)には、試験体B1-4の破面を示す。き裂は溶接止端の3箇所から発生し、作用応力に垂直にトラフリブ下面を貫通する方向に半楕円形状で進展している。

各試験体の疲労寿命を表1に示す。ここでは、トラフリブとダイアフラムの溶接部で、目視によりき裂が発見された時の繰返し回数をき裂発生回数  $N_c^*$ 、き裂がトラフリブの側面まで進展した時の繰返し回数を疲労寿命  $N_f$  とした。なお、 $N_f$  にはビーチマーク試験の回数は含まない。き裂が発見された位置とその時のき裂長も表1に示す。き裂は20～170mmになった段階で発見された。また目違い  $e_r$  は試験体製作後に実測した値であり、ほとんどの試験体において目標値  $e$  との差が生じている。

試験体B1の  $S-N_f$  線図を図5に示す。縦軸は、等曲げ区間内におけるトラフリブ下面で計算された公称応力範囲で、横軸は、繰返し回数  $N_f$  である。図中に、今回の疲労試験結果より最小2乗法で求めた50%破壊確率線を実線で、97.5%非破壊確率線を破線で示す。これらの傾きは  $-1/3.6$ 、外挿により50%破壊確率線から求めた200万回疲労強度は約101MPa、97.5%非破壊確率線から求めた200万回疲労強度は約91MPaであった。

つぎに、設計基準としてヨーロッパ鋼構造協会連合の疲労設計指針(ECCS)(1985年)<sup>6)</sup>、日本鋼構造協会の疲労設計指針(JSSC)(1993年)<sup>7)</sup>で規定されている設計  $S-N$  線図と比較した。用いた設計  $S-N$  線図は、①中空断面部材を隔板を介して片側からグループ溶接した完全溶込み溶接継手(ECCS 45、JSSC F(65))、②完全溶込み溶接、止端部非仕上げ継手(ECCS 71、JSSC E(80))、

に対応するものである。図5より、疲労試験体は、いずれの設計基準よりも長寿命側にあることがわかる。また、JSSC E(80)が試験体B1の疲労試験結果と最もよく対応していることが認められる。

### (3) 折れ角および目違いの影響

折れ角のない試験体A1では疲労き裂はすべてルート部から発生したが、試験体B1、B2、B3、B4ではほとんど溶接止端からき裂が発生した。折れ角を有することで疲労き裂が溶接止端部から発生する確率が高くなると言える。これは、折れ角が若干あるため、トラフリブや裏当て金の製作や、溶接施工が若干難しくなり、その結果溶接止端形状が悪化したためではないかと思われる。また、目違い量とダイアフラム厚を変えた試験体B1、B2、B3、B4を比較すると、き裂発生箇所の差が認められない。目違い量とダイアフラム厚は、き裂発生箇所に対してそれほど影響しないと言える。

試験体B1(ダイアフラム厚:9mm、折れ角:有り)とA1(ダイアフラム厚:9mm、折れ角:無し)の疲労試験結果を図6に示す。試験体A1の疲労寿命は、試験体B1の疲労寿命の平均値(50%破壊確率線)よりは多少低くなっているものの、97.5%非破壊確率線近傍にあり、疲労寿命の有意な差は認められない。したがって、B1の折れ角の存在が、疲労強度におよぼす影響は少ないと思われる。折れ角のない試験体A1と試験体A2

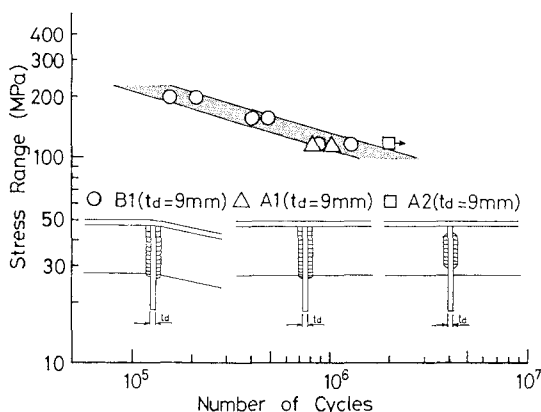


図6 折れ角の有無による疲労寿命の比較

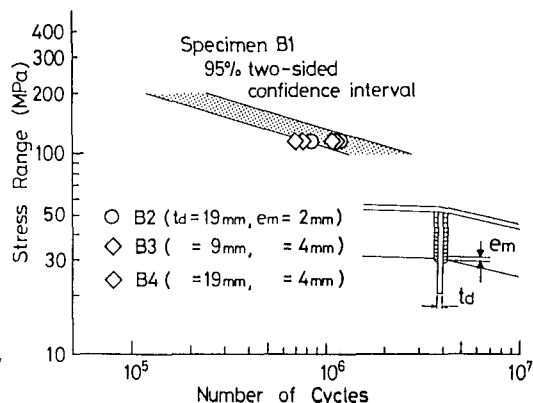


図7 目違いの程度及びダイアフラム厚による疲労寿命の比較

を比較すると、ダイアフラムを切り欠いて縦リブを連続させた試験体 A2 は試験体 A1 よりも疲労強度が高くなることが確認された。

目違い量を変えた試験体 B2、B3、B4 の疲労試験結果を、試験体 B1 の疲労試験結果の 95% 信頼区間と共に図 7 に示す。試験体 B3(目違いの目標値:-4mm、ダイアフラム厚:9mm) の 2 体の疲労試験結果は、試験体 B1 の疲労試験結果の 95% 信頼区間外にあり、目違い量が増えることにより、疲労寿命が低下する傾向にある。また試験体 B2(目違いの目標値:+2mm、ダイアフラム厚:19mm) と試験体 B4(目違いの目標値:-4mm、ダイアフラム厚:19mm) の疲労試験結果を比較すると、どちらも試験体 B1 の疲労試験結果の 95% 信頼区間近傍にあり、有為な差は認められない。さらにこれらの疲労試験結果はいずれも試験体 B3 より高めの疲労寿命を示している。したがって、ダイアフラム厚を増すことにより、疲労寿命が延び、多少の目違いを許容することができる傾向があることがわかる。

### 3. トラフリブとダイアフラムの交差部の応力解析

#### (1) 解析モデル

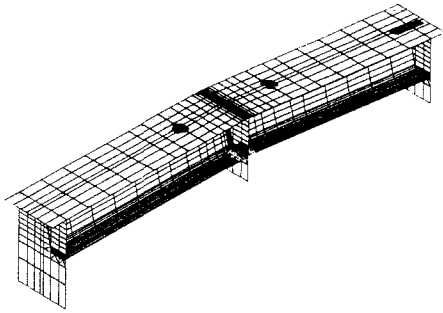
疲労き裂の発生した溶接部をさらに詳細に検討するため、試験体の全体モデルと溶接部分のモデルについて有限要素解析を行った。解析には汎用プログラム COSMOS/M を用いた。

試験体の全体モデル:解析モデルは試験体と同じ形状とし、全体の 1/2 を解析した。解析には薄肉 SHELL 要素を用い、最小要素はトラフリブとダイアフラムの交差部近傍において、 $1 \times 2\text{mm}$  とした。解析モデルは、表 2 に示すように、折れ角 ( $\theta = 6.4^\circ$ ) の有無、ダイアフラム (隔板) 厚  $t_d$  で、 $t_d = 9\text{mm}$  と  $19\text{mm}$  の 2 種類、および目違い量  $e$  で、 $e = 0, -2, -4, -6\text{mm}$  の 4 種類の合計 9 種類とした。この解析では裏当て金は無視した。

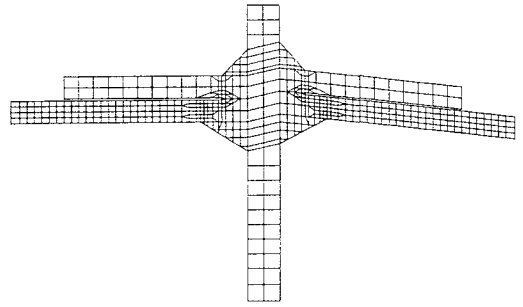
表 2 解析モデル

| No | Name of model | Crank | Thickness of Diaphragm $t_d$ (mm) | Misalignment $e$ (mm) |
|----|---------------|-------|-----------------------------------|-----------------------|
| 1  | T9D0          | ×     | 9                                 | 0                     |
| 2  | T9D0          | ○     | 9                                 | 0                     |
| 3  | T9D2          | ○     | 9                                 | -2                    |
| 4  | T9D4          | ○     | 9                                 | -4                    |
| 5  | T9D6          | ○     | 9                                 | -6                    |
| 6  | T19D0         | ○     | 19                                | 0                     |
| 7  | T19D2         | ○     | 19                                | -2                    |
| 8  | T19D4         | ○     | 19                                | -4                    |
| 9  | T19D6         | ○     | 19                                | -6                    |

溶接部分モデル:目違いによる応力集中を把握するため、図 8(b) に示すように、トラフリブとダイアフラムの溶接止端部近傍を対象として、応力解析を行った。要素は 2 次元平面要素を用い、最小要素は、溶接止端部と溶接ルート部でそれぞれ  $1 \times 1\text{mm}$  とした。溶接部分モデルでは、試験体の全体モデルの有限要素解析結果から溶接部近傍の変位を取り出し、これを溶接部分モデルの境界条件として強制変位を与えて解析した。



(a) 試験体形状モデル



(b) 溶接部分モデル

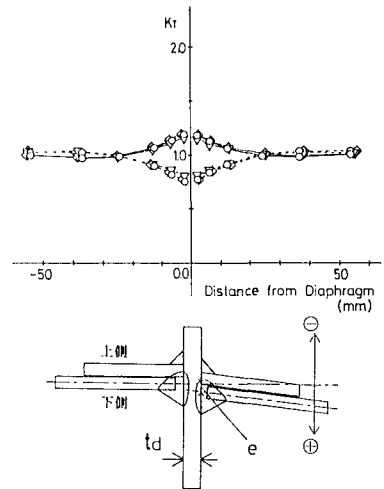
図 8 解析モデル

## (2) 解析結果および考察

目違い量  $e = 0\text{mm}$  の試験体の全体モデルによる解析結果を図 9 に示す。横軸はダイアフラムから橋軸方向の距離で、縦軸は応力集中係数  $K_T$  である。まず、目違い 0 で折れ角がある解析モデル T9E0 と T19E0 を比較すると、目違いが存在しない場合には、ダイアフラム厚が  $9\text{mm}$  から  $19\text{mm}$  になっても交差部近傍の応力分布にほとんど影響を及ぼさないことがわかる。また、ダイアフラム厚  $9\text{mm}$  で折れ角のある解析モデル T9E0 と折れ角のないモデル T9D0 を比較すると、ほとんど応力分布は変化していない。したがって、目違いがない場合、折れ角も影響しない。図 10(a)、(b) に、ダイアフラム厚  $t_d = 9\text{mm}$  で目違い量  $e = 0, -2, -4, -6\text{mm}$  の試験体の全体および溶接の部分モデルによる解析結果の応力分布を示す。トラフリブ下面中央線上での板の上縁および下縁の応力分布を示す。トラフリブがダイアフラムに溶接されている交差部から  $20\text{mm}$  以内の範囲で応力集中が生じ、目違い量が大きくなるほど、応力集中も高くなることが認められる。

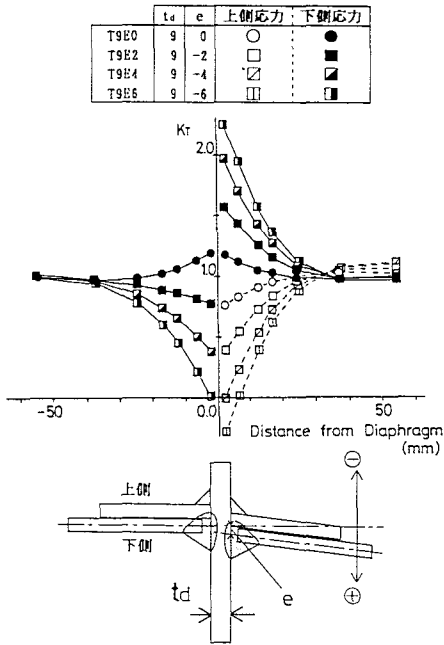
さらに、交差部に近くなるほどトラフリブに板曲げ(上縁と下縁の応力の差)が生じており、目違い量が増えるほど板曲げの程度も増加していることが認められる。特に目違い量  $e = -6\text{mm}$  のモデルでは、交差部が正の等曲げ区間にあり、公称応力は引張であるのに、トラフリブ下面の板の上側(つまりトラフリブ内部)に圧縮応力が生じるほどの過大な板曲げが生じている。これらは、トラフリブとダイアフラムの交差部でトラフリブが不連続であるのに加えて、目違いの存在により交差部で、付加曲げモーメントが発生したためであると考えられ、目違い量が疲労強度低下の要因になる可能性があることを示唆している。

|       | 折れ角 | $t_d$ | $e$ | 上側応力 | 下側応力 |
|-------|-----|-------|-----|------|------|
| T9D0  | ×   | 9     | 0   | ○    | ○    |
| T9E0  | ○   | 9     | 0   | ○    | ○    |
| T19E0 | ○   | 19    | 0   | ○    | ○    |

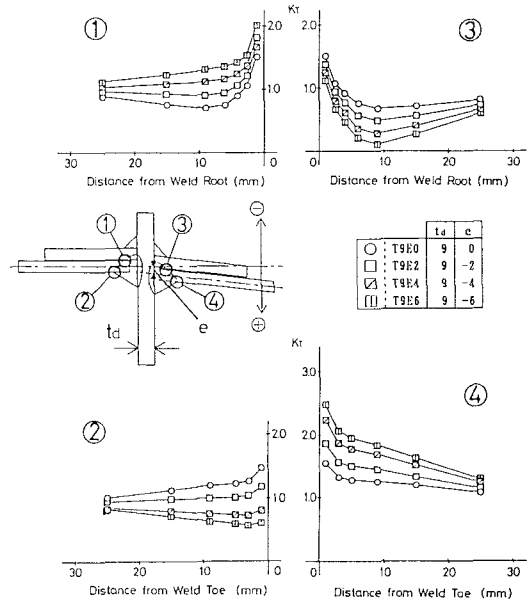


(a) 試験体形状モデル

図 9 目違いがない場合の解析結果

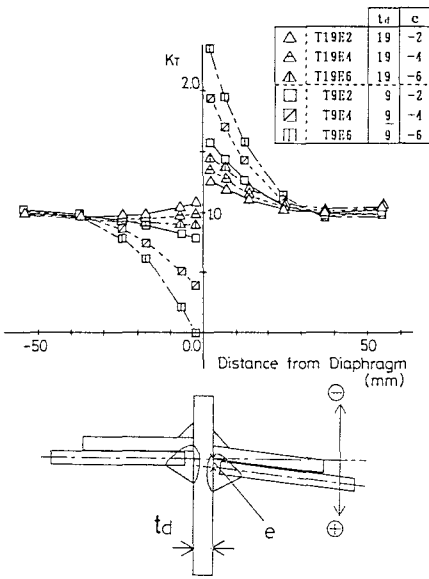


(a) 試験体形状モデル

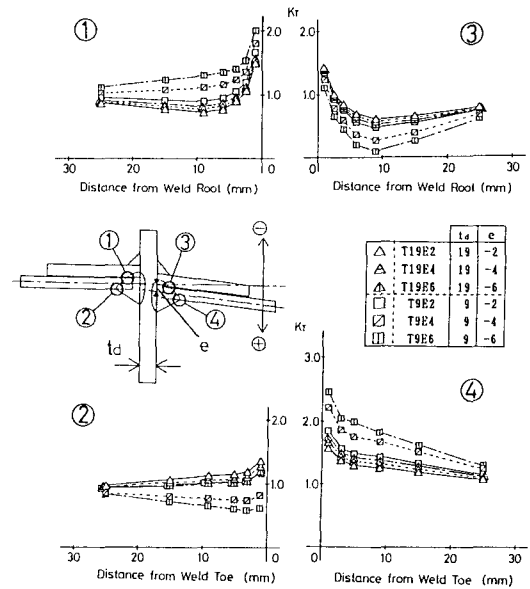


(b) 溶接部分モデル

図 10 目違いが交差部近傍の応力分布に及ぼす影響



(a) 試験体形状モデル



(b) 溶接部分モデル

図 11 ダイアフラム厚による応力集中低減効果

ダイアフラム厚  $t_d = 19\text{mm}$  のモデルについても、表 2 に示すように  $t_d = 9\text{mm}$  の場合と同様、目違い量を  $e = 0, -2, -4, -6\text{mm}$  と仮定して解析した。図 11(a)、(b) に、解析結果の応力分布を示す。ダイアフラム厚が  $9\text{mm}$  から  $19\text{mm}$  に増加したことにより、交差部近傍の応力集中および板曲げ応力が緩和されていることが認められる。

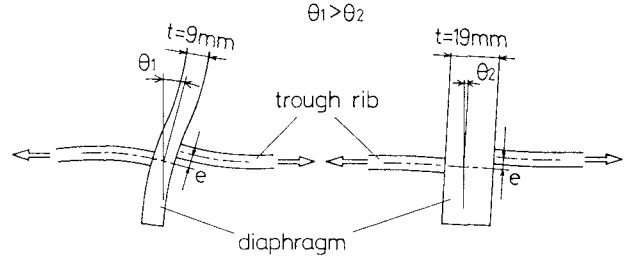


図 12 ダイアフラム厚の増加による交差部の回転変形の緩和

これはダイアフラム厚が増加することにより、図 12 に示すように、トラフリブとダイアフラムの交差部の回転変形が小さくなり、局所的な板曲げが緩和されるためであると思われる、ダイアフラム厚を増すことにより目違いが生じた場合の応力集中および板曲げの低減が期待できる。

#### 4. 破壊力学を用いた疲労寿命解析

##### (1) 破壊力学による疲労寿命解析

前節で用いた応力解析結果を用いて、線形破壊力学の手法<sup>8)</sup>により疲労き裂進展寿命  $N_p$  を計算し、疲労試験結果と比較する。用いた疲労き裂進展速度  $da/dN(\text{m/cycle})$  は次式で表される。

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K^m - \Delta K_{th}^m) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、材料定数は、 $C = 1.5 \times 10^{-11}$ 、 $m = 2.75$ 、 $\Delta K_{th} = 2.9(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$  を用いた<sup>7)</sup>。また、応力拡大係数範囲  $\Delta K$  は、次式で示す。

$$\Delta K = F_s \cdot F_e \cdot F_t \cdot F_g \cdot \sigma_r \cdot \sqrt{\pi a} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $F_s$  は自由表面補正係数、 $F_e$  はき裂形状補正係数、 $F_t$  は有限板厚補正係数、 $F_g$  は幾何学形状補正係数<sup>9)</sup>、 $\sigma_r$  は応力範囲 (MPa)、 $a(\text{m})$  はき裂長である。

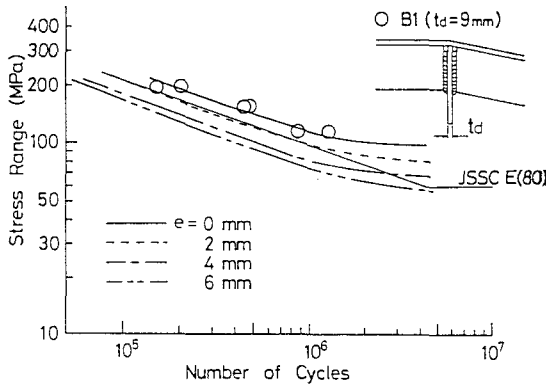
初期き裂長さ  $a_0$  から最終き裂長さ  $a_f$  までき裂が進展するための繰り返し回数、すなわち、疲労き裂進展寿命  $N_p$  は、式 (3) を、そのき裂長さ区間 ( $a_0 \sim a_f$ ) で数値積分することにより得られる<sup>10)</sup>。

$$N_p = \frac{1}{C} \int_{a_0}^{a_f} \frac{1}{(F \cdot \sqrt{\pi a})^m} da \cdot \sigma_r^{-m} \dots\dots\dots (3)$$

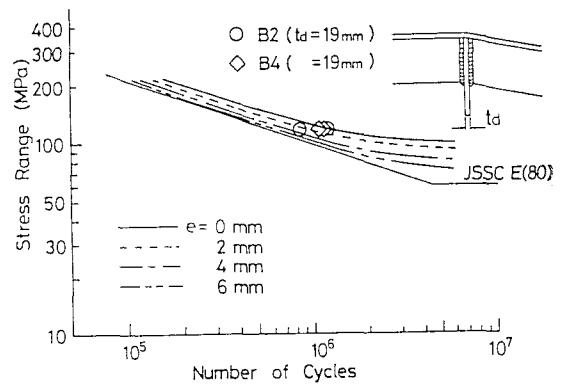
前節で示した応力解析結果より、溶接止端部の応力集中係数が溶接ルート部より常に高くなっていた。そこで、トラフリブ側の溶接止端部から発生するき裂を対象として、破壊力学を用いたパラメトリックな疲労寿命解析を行う。この部分の疲労き裂進展に影響を及ぼす因子として、目違い量、ダイアフラム厚および折れ角をとり上げた。その他の因子、たとえば、初期き裂長  $a_0 = 0.1\text{mm}$ 、き裂形状  $a/b = 1/3$  (ビーチマークを測定した平均値)、最終き裂長  $a_f = 6\text{mm}$  など是一定とした。

##### (2) 疲労寿命解析結果および目違い許容範囲の推定

疲労試験体のトラフリブ側溶接止端部から発生するき裂に対する疲労き裂進展寿命の解析結果を、図 13(a)、(b) に示す。比較に用いた試験体は、目違いの目標値  $e$  が  $2\text{mm}$  でダイアフラム厚  $t_d$  がそれぞれ  $9\text{mm}$  と  $19\text{mm}$  のものである。ダイアフラム厚  $9\text{mm}$  の場合は、目違いが大きくなると応力集中係数が大きくなり疲労寿命が大きく低下するが、 $19\text{mm}$  の場合は低下の割合が小さいことがわかる。また目違いを  $2\text{mm}$  と仮定した解析値が実験値より若干低い値であるものの、特にダイアフラム厚  $19\text{mm}$  の場合は良い対応を示しているのが認められる。



(a) ダイアフラム厚：9mm



(b) ダイアフラム厚：19mm

図 13 疲労寿命解析結果（溶接止端部）

また表 3 には、試験体で測定した目違いの実測値の最大値  $e_r$ 、ダイアフラム厚  $t_d$ 、疲労寿命の実験値  $N_{fE}$  および解析値  $N_{fA}$ 、およびその比  $N_{fA}/N_{fE}$  を示した。これより、ダイアフラム厚が 19mm の試験体 B2、B4 は、 $N_{fA}/N_{fE}$  が 0.65～0.95 と比較的良好に対応をしているが、ダイアフラム厚が 9mm の試験体 B1、B3 は、その比が 0.25～0.81 となっており、かなりのばらつきが生じている。

また、目違い量を変えた場合の疲労寿命の解析結果は、低～中寿命域ではほぼ平行になっており、目違い量の増加に伴って溶接止端部の応力集中が増加し、疲労寿命が一定の割合で低下していることが認められる。またダイアフラム厚に着目すると、ダイアフラム厚  $t_d = 19\text{mm}$  の場合の方が目違いの増加に対する疲労寿命低下の割合が少ないことが認められる。

表 3 疲労寿命解析結果

| Specimens | Miss-alignment $e_r$ (mm) | Stress range $\sigma_r$ (MPa) | $N_{fE}$ ( $\times 10^3$ ) | $N_{fA}$ ( $\times 10^3$ ) | $\frac{N_{fA}}{N_{fE}}$ |
|-----------|---------------------------|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|
| A1-1      | +1.4                      | 117.6                         | 834                        | 629                        | 0.75                    |
| A1-2      | -0.8                      | 117.6                         | 1045                       | 743                        | 0.71                    |
| B1-1      | -                         | 117.6                         | 888                        | 433                        | 0.33                    |
| B1-2      | +2.8                      | 117.6                         | 1301                       | 83                         | 0.54                    |
| B1-3      | +3.5                      | 196.0                         | 154                        | 122                        | 0.25                    |
| B1-4      | +5.0                      | 156.8                         | 480                        | 333                        | 0.81                    |
| B1-5      | 0.0                       | 156.8                         | 413                        | 83                         | 0.38                    |
| B1-6      | +3.4                      | 196.0                         | 221                        | 1055                       | 0.88                    |
| B2-1      | -0.6                      | 117.6                         | 1203                       | 826                        | 0.95                    |
| B2-2      | +2.5                      | 117.6                         | 874                        | 265                        | 0.34                    |
| B3-1      | -5.4                      | 117.6                         | 780                        | 309                        | 0.43                    |
| B3-2      | -4.1                      | 117.6                         | 717                        | 786                        | 0.66                    |
| B4-1      | -3.0                      | 117.6                         | 1189                       | 721                        | 0.65                    |
| B4-2      | +3.8                      | 117.6                         | 1112                       | 1074                       | 0.97                    |

つぎに、目違い量の許容範囲の推定を行う。まずダイアフラム厚  $t_d = 9\text{mm}$  の場合には、図 13(a) に示すように、目違い量  $e$  が 0mm から 2,4,6mm と増加するにつれて、疲労寿命がそれぞれ 57,35,27%と減少する。また、ダイアフラム厚  $t_d = 19\text{mm}$  の場合には、図 13(b) に示すように、それぞれ 76,62,52%となる。実験結果から、目違いの目標値を 2mm とした試験体 B1 に対応する設計  $S-N$  線図として、JSSC E(80) を採用した。したがって、目違い量を増加させた解析結果が JSSC E(80) を満足すれば、實際上それほど疲労寿命に差は生じないと仮定して、目違いの許容範囲を推定することとする。このようにすると、ダイアフラム厚が 9mm の場合は、目違い量  $e = 2\text{mm}$  の解析結果が JSSC E(80) とほぼ同一線上にあり、これを目違いの許容範囲とすることができる。これはトラフリブの板厚に対して、33%に相当する。また、ダイアフラム厚が 19mm の場合は、目違い量がたとえば  $e = 6\text{mm}$  であっても、JSSC E(80) を満たしている。したがって、ダイアフラム厚が 19mm の場合には、目違い量の許容範囲を 6mm 程度とすることも可能で、許容範囲が大きいためこの部分の製作が容易になると思われる。

## 5. 結論

本研究では、鋼床版と RC 床版が接合されるようなトラフリブとダイアフラムの交差部を対象として疲労評価を行うために、まず接合部の原寸大のモデルを用いた疲労試験により、接合部の疲労強度を求めた。つぎにトラフリブに目違いがある場合を考慮した有限要素解析により接合部近傍の応力分布を求め、疲労強度への影響を考察した。さらに破壊力学を用いた疲労寿命解析を行って、疲労試験結果と比較した。

本研究の結果をまとめると、以下の通りである。

- ① 鋼床版と RC 床版接合部をモデル化した試験体 B1(折れ角  $6.4^\circ$ ) では、200 万回疲労強度の平均値は 101MPa、97.5%非破壊確率線から求めた 200 万回疲労強度は 91MPa であった。これは日本鋼構造協会の疲労設計指針で示されている荷重伝達型十字溶接継手の設計  $S-N$  線図 (JSSC E(80)) を満足しており、これを設計  $S-N$  線図として用いることができる。
- ② 疲労き裂は、トラフリブとダイアフラムのレ型開先グループ溶接部のトラフリブ側溶接止端部あるいは溶接ルート部から発生し、板厚を貫通する方向に半楕円形状で進展した。この場合、き裂発生位置はおもに溶接形状、溶接欠陥の存在に左右されると思われる、目違い量およびダイアフラム厚の影響はみられなかった。また、折れ角が  $6.4^\circ$  程度では、それ自体がき裂発生箇所に影響を及ぼすとは認められないが、溶接施工条件および溶接形状に影響する可能性がある。
- ③ 折れ角はトラフリブとダイアフラムの交差部近傍の応力分布に影響がなく、目違いは交差部近傍の応力分布に影響を及ぼす。目違い量が大きくなるほど応力集中も大きくなる。さらに目違いが存在する場合、ダイアフラム厚を増すことにより、交差部近傍の応力集中を低減できる傾向がある。
- ④ 疲労試験では、疲労寿命に目違いの影響が鮮明に現れなかった。しかし、破壊力学を用いた疲労寿命解析では、目違い量の増加により疲労寿命が低下すること、およびダイアフラム厚を増すことにより疲労寿命の低下幅を小さくできることが認められた。
- ⑤ 疲労試験および疲労寿命解析の結果より、接合部の目違いの許容範囲は、ダイアフラム厚が 9mm の場合には 2mm(トラフリブの板厚に対する目違い量の割合 : 33%)、ダイアフラム厚が 19mm の場合には 6mm(トラフリブの板厚に対する目違い量の割合 : 100%) と推定された。

## 謝辞

本研究は、名港東大橋(仮称)の床版接合部の設計に反映させるために、名港大橋特別委員会(伊藤学委員長)での検討をふまえて、名古屋大学で実験および解析を行ったものである。試験体の製作および破面観察はトピー工業(株)にお願いした。実験を進めるにあたり、名城大学土木工学科近藤明雅助教授、および名古屋大学土橋勝(現・横河ブリッジ)、吉川正城(現・日本車両)、高野正光(現・JR東海)、名城大学河村和紀(現・オオバ)、坂戸祥治(現・名古屋高速道路公社)の諸氏に御協力頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、丸善、1980。
- 2) 土木学会、鋼構造委員会・鋼床版の疲労小委員会：鋼床版の疲労、土木学会論文集、第 410 号/I-12、pp.25-36、1989 年 10 月。
- 3) 土木学会：鋼床版の疲労、1990。
- 4) 森邦久、帆足博明、木村一也：生口橋接合部実験報告、本四技報 Vol.13 No.49、pp.48-52、1989.1。
- 5) 山岸一彦、西本聡、矢野保広：生口橋主桁接合部の設計・施工、本四技報 Vol.15 No.58、pp.14-22、1991.4。
- 6) ECCS-第 6 技術委員会「疲労」：日本鋼構造協会 No.43, Recommendations for the Fatigue Design of steel structures, 1985。
- 7) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説、1993.3。
- 8) 村上裕則・大南正瑛：破壊力学入門、オーム社、1979。
- 9) Albrecht, P. and Yamada, K.: Rapid Calculation of Stress Intensity Factors, Proc. of ASCE, Vol.103, No.ST2, pp.377-389, Feb. 1977。
- 10) 山田健太郎, Hirt, M.A.: 破壊力学を応用したパラメトリックな疲労寿命解析, 土木学会論文報告集, 第 319 号, pp.55-64, 1982 年 3 月。

(1993 年 9 月 16 日 受付)