

# サンドイッチ型複合床版の継手部に関する研究

## Study on Joint Strength of Steel-Concrete Sandwich Slab

阿部幸夫\*、柳本泰伴\*\*、井澤衛\*\*\*

Yukio ABE, Yasutomo YAGIMOTO and Mamoru IZAWA

\*工修 住友金属工業(株) 建設技術部 (〒314-0255 茨城県鹿島郡波崎町砂山16)

\*\*工修 住友金属工業(株) 土木・橋梁技術部 (〒100-8113 東京都千代田区大手町1-1-3)

\*\*\*工修 住友金属工業(株) 土木・橋梁技術部 (〒100-8113 東京都千代田区大手町1-1-3)

The objective of this study is to investigate the static and fatigue strength of the joints for closed steel-concrete sandwich slab. The sandwich slab panel consists of CT shape steel welded on the bottom plates with certain interval, covering plates on the upper surface of CT shape steel, and cast-in-place concrete filled into the spaces. We adopted two types of joint for the bottom plates, one is flange connection with tensile bolts and another is friction grip connection with bolts. To investigate the mechanical characteristics of these joints, tensile experiments, static loading-experiment and fatigue experiments were carried out. As a result, it was confirmed that the proposed two types of joint were applicable to practical use.

**Key Words :** sandwich slab, joint, tensile bolt, prying force, friction grip connection with bolt

### 1. まえがき

最近、鋼橋に用いられる床版には、主桁間隔が6mを越えるような少数主桁形式にも適用でき、かつ、床版建設の省力化・急速施工ならびに高耐久化といった要求にも満足するものが求められている。

著者らは、これらの要求を満足する床版として、鋼とコンクリートからなるサンドイッチ型複合床版を提案し、その耐荷性能ならびに定点載荷と輪荷重走行載荷による疲労耐久性能を調査した結果、床版本体が十分実用に供しうる構造形式であることを確認している<sup>1)</sup>。

本研究では、本床版パネルを橋軸方向に配置していく際の現場継手に関し、施工性を考慮した構造を提案し、さらに本構造に対して、静的引張載荷実験、静的曲げ載荷実験ならびに定点疲労載荷実験を実施<sup>2), 3)</sup>したので、その結果について報告する。

### 2. 床版の本体および継手構造

本床版は、図-1に示すように、工場にて底鋼板の橋軸直角方向にCT形鋼を溶接し、さらにCT形鋼のフランジ上にデッキプレート(床版)を溶接により固定して、この鋼殻部を施工現場に搬入し、鋼桁上に架設後、鋼殻内に高流動コンクリートを充填することにより形成する。なお、鋼殻部の組立は、すべてすみ肉溶接により行う。

また、床版パネル相互の橋軸方向の接合を行う継手部に関しては、床版鋼殻部架設後、床版パネル間の底鋼板同士を連結し、デッキプレートをパネル端部のCT形鋼

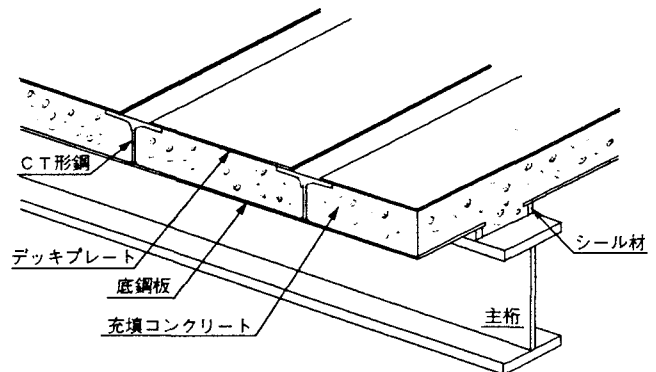


図-1 サンドイッチ型複合床版

間に現場溶接により取付け、得られた鋼殻内に高流動コンクリートを充填することにより完成する。

ここで、継手部での底鋼板連結方法であるが、床版上面からの作業のみで連結可能な構造形式として以下の2案を検討し、この2形式を本研究の対象とした。

- ① 図-2に示す高力ボルト引張接合であり、床版パネル端部の底鋼板に継手板を溶接により取付け、この継手板を底鋼板の上面に配置したボルトにより連結する形式。
- ② 図-3に示す片面添接高力ボルト摩擦接合であり、床版パネル端部の底鋼板の上面にボルト落下防止金具およびこれを収めるフィラープレートを設置し、その上面に添接板を配置してボルトで締め付ける形式。

### 3. 実験内容

#### (1) 静的引張載荷実験

##### a) 目的

本実験は高力ボルト引張接合を対象として実施する。

高力ボルト引張接合に関しては、橋梁を対象とする設計指針(案)<sup>4)</sup>がすでに刊行されている。しかし、本指針(案)は、ボルトが連結部材の両側に配置されているT型形式を対象としており、本床版のようにボルトが底鋼板の片側だけに配置された偏心接合となるL型形式に対しては設計法に関する規定がない。

そこで、本実験は、偏心接合に対して静的引張載荷を実施し、その耐荷力、とくに反力の影響について調査することを目的とした。

##### b) 供試体および載荷方法

供試体の形状を図-4に示す。本供試体は、いずれも板厚6mmの底鋼板に継手板を設置し、F10T, M16のボルトを145mm間隔で2本配置する形状とした。

実験パラメータは、図-4に示す継手板厚 $t_j$ 、ボルト中心位置から底鋼板上表面までの距離 $a_1$ およびボルト中心位置から継手板上端までの距離 $a_2$ とした。各ケースの諸元を表-1に示す。ここで、B-1~B-4は底鋼板連結部だけの供試体であるのに対して、C-1はCT形鋼およびデッキプレートからなる鋼殻内にコンクリート(圧縮強度 $307 \text{ kgf/cm}^2$ )を充填したものである。ボルトには、公称耐力の75%に相当する $6,750 \text{ kgf/cm}^2$ の初期軸応力を導入した。載荷方法は、いずれのケースも底鋼板を直接引張る方法とした。

#### (2) 静的曲げ載荷実験

##### a) 目的

本実験は、実際に高力ボルト引張接合を継手部に適用した際の耐荷挙動を調査することを目的とした。

##### b) 供試体および載荷方法

供試体の数は1体とし、その断面形状を図-5に示す。本供試体は、床版支間6mを想定した実橋継手構造の約70%縮尺モデルであり、その断面は、先の静的引張載荷実験のC-1とほぼ同等の床版厚で、鋼殻部板厚およびボルト位置に関しては同一である。供試体は橋軸直角方向幅1m、橋軸方向長さ3.03mの梁形状とした。また、ボルトの初期導入軸応力を $6,750 \text{ kgf/cm}^2$ とし、鋼殻内に充填したコンクリートの圧縮強度は $433 \text{ kgf/cm}^2$ であった。載荷方法は、支点スパンを2.8mとし、その中央に載荷スパン0.8mで2線載荷する方法とした。

#### (3) 定点疲労載荷実験

##### a) 目的

本実験は、高力ボルト引張接合(以下引張接合と呼ぶ)および片面添接高力ボルト摩擦接合(以下摩擦接合

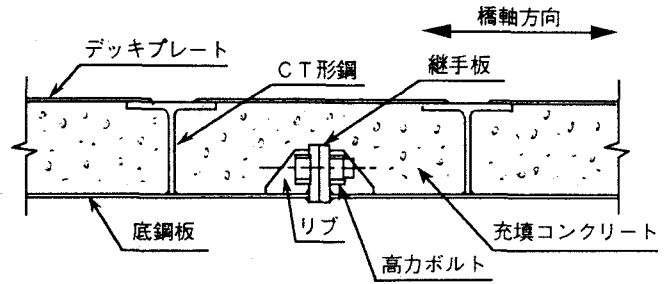


図-2 高力ボルト引張接合

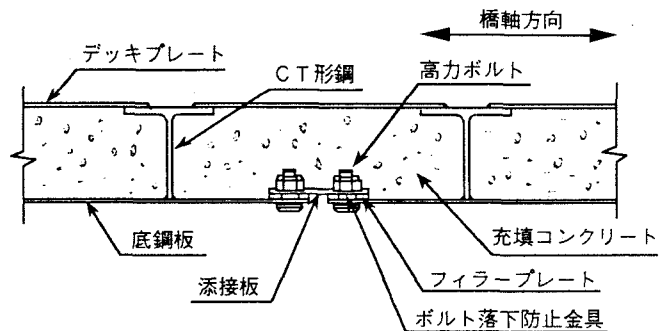


図-3 片面添接高力ボルト摩擦接合

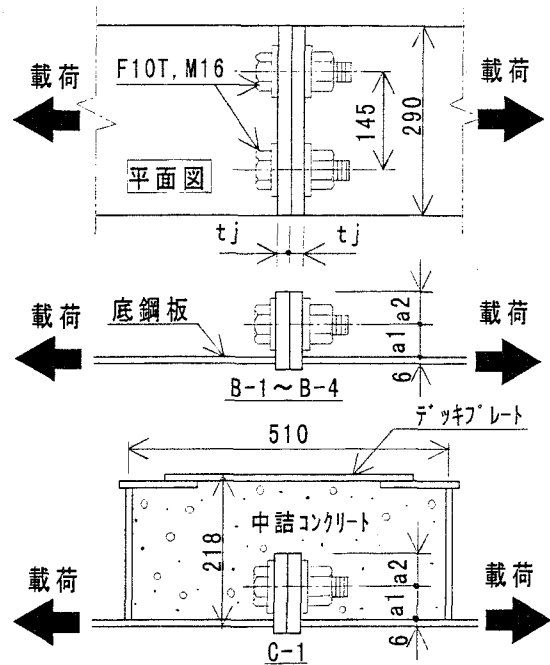


図-4 静的引張載荷実験供試体

表-1 静的引張載荷実験ケース

ケース名	継手板厚 $t_j$ (mm)	ボルト中心- 底鋼板上表面距離 $a_1$ (mm)	ボルト中心- 継手板上端距離 $a_2$ (mm)	中詰めコンクリート
B-1	16	47	29	無し
B-2	9	47	29	無し
B-3	16	47	47	無し
B-4	16	36	36	無し
C-1	16	47	29	有り

と呼ぶ)において、活荷重に対する疲労耐久性を調査することを目的とした。

### b) 供試体および载荷方法

引張接合供試体を図-6に、摩擦接合供試体を図-7に示す。引張接合実験は、実橋の床版をモデル化した継手部を有する版構造に対し主桁支持条件での定点疲労载荷実験とした。一方、摩擦接合実験は、橋軸方向の梁構造に対し供試体中央部に配置した継手部に橋軸方向繰返し曲げ力を作用させる疲労载荷実験とした。

引張接合供試体の形状は、橋軸直角方向4.36m、橋軸方向5mの版とし、橋軸方向中央の位置に継手を設けた。断面形状は、C T形鋼間隔が510mmと広くなった以外は、図-5に示す静的曲げ载荷実験供試体と同一の実橋縮尺比約70%モデルである。

载荷方法は、床版支間6mを想定し、上記縮尺に合わせた4.36mの間隔で供試体両端を線支持し、T60相当後輪1輪荷重24tfに対して縮尺を考慮した変動荷重範囲13tf(最大14tf、最小1tf)で200万回繰返し载荷させた。载荷位置は、継手にせん断力も作用するように、床版中心の継手位置から159mm(床版上面からボルト位置までの深さ)橋軸方向に偏芯させた(载荷面形状:橋軸直角方向360mm、橋軸方向145mm)。ただし、計測時は継手位置の曲げモーメントが最大となる床版中心に载荷した。なお、载荷時の発生ひずみの測定値および版モデルFEM解析から、偏芯载荷時の継手に生じる曲げモーメントは中央载荷時の約80%であった。

摩擦接合供試体の形状は、橋軸直角方向幅1m、橋軸方向長さ3.03mの梁形状とし、橋軸方向中央に継手を設けた。本供試体の断面も引張接合実験と同様、実橋の約70%縮尺モデルである。

载荷方法は、支点スパンを2.8mとし、その中央に载荷スパン0.8mで2線载荷する方法とした。载荷荷重は、引張接合実験と同様の主桁支持版に対する载荷状態で床版中央に発生する橋軸方向発生曲げモーメントを等方性版のFEM解析により求め、この曲げモーメントが継手に生じるときの変動荷重範囲5.6tf(最大6.6tf、最小1tf)で200万回繰返し载荷させ、その後さらに荷重を上げる段階载荷とした。

引張接合および摩擦接合の両供試体とも、ボルトの初期導入軸応力を $6,750\text{kgf/cm}^2$ とし、鋼殻内に充填したコンクリートの圧縮強度は $470\text{kgf/cm}^2$ であった。

なお、引張接合供試体に版モデルを用いた理由であるが、引張接合の場合は、継手板の板曲げの影響等により本体部に対して継手の曲げ剛性が小さくなると考えられる。この場合、継手において、橋軸方向発生曲げモーメントは本体部より減少し、逆に、橋軸直角方向発生曲げモーメントが本体部より増加する。また、疲労劣化により継手の曲げ剛性が低下すると、荷重の再配分が生じて継手に発生する橋軸方向曲げモーメントはさらに低下する。このような挙動を考慮すると、常に一定の曲げモーメントを作用させる梁モデル供試体では継手

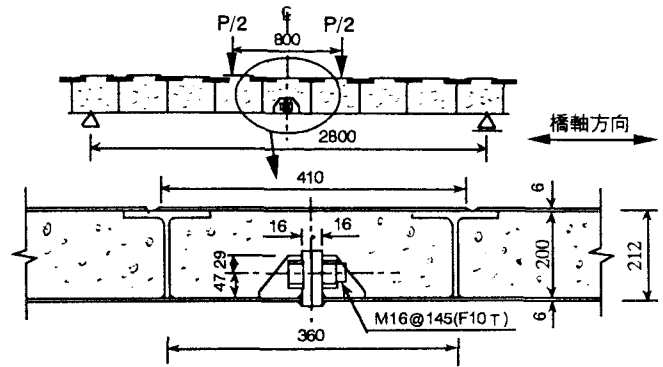


図-5 静的曲げ载荷実験供試体

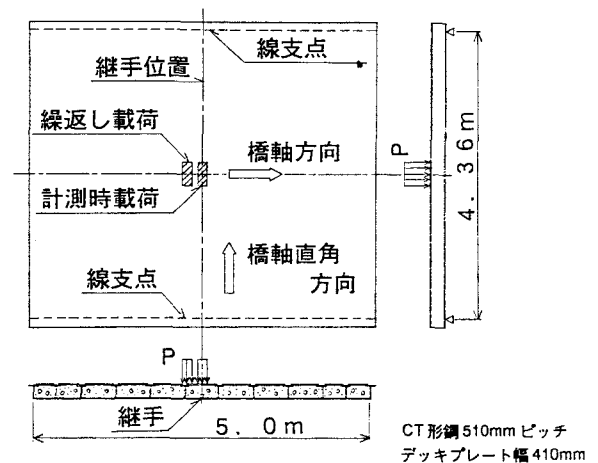


図-6 疲労载荷実験引張接合供試体

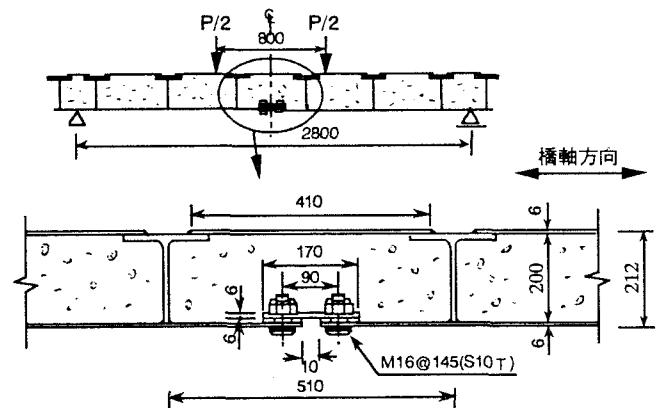


図-7 疲労载荷実験摩擦接合供試体

部の疲労強度を過小評価する可能性があるので、版モデルによる引張接合供試体を採用することにした。

一方、摩擦接合供試体は、添接作用により継手も本体部と同程度の曲げ剛性を有し、また、疲労劣化による影響も小さいと考えられるため、実験の簡便性から梁モデルを採用することにした。

## 4. 実験結果

### (1) 静的引張载荷実験

高力ボルト引張接合を用いた各供試体に対し、底鋼板

の引張荷重を実施した結果、いずれのケースもボルトの破断により実験を終了した。その際の最大耐力は、供試体に用いたボルトの材料試験による引張強度2本分の1/2~1/3であった。これは、てこ作用による反力（てこ反力）がボルトに作用したことによる。

用いたボルトの材料試験による引張強度と本実験での底鋼板最大引張力の差がてこ反力であるとして算定した最大耐力時てこ反力係数（てこ反力と底鋼板引張力との比）の実験値を表-2に示す。なお、C-1では中詰めコンクリート等の影響により載荷荷重と底鋼板引張力とが一致しないため、底鋼板に貼付したひずみ測定結果から底鋼板の引張力を求めて、てこ反力係数を算定した。

てこ反力係数の実験値から次のことが考察できる。

- ① B-1とB-2との比較により、継手板厚  $t_j$  の変化がてこ反力に及ぼす影響は小さい
- ② B-1とB-3との比較により、ボルト中心位置から継手板上端までの距離  $a_2$  が大きくなると、てこ反力は小さくなる
- ③ B-3とB-4との比較により、先の  $a_2$  とボルト中心位置から底鋼板上面までの距離  $a_1$  との比率  $a_2/a_1$  が同一の場合、てこ反力の変化は小さい
- ④ B-1とC-1との比較により、継手構造が同一でも中詰めコンクリートが存在すると、てこ反力が大きくなる傾向にある

ここで、実験結果から得られたてこ反力を推定する方法として、図-8に示すように、てこ反力作用位置を継手板上端部とするモデルを考える。なお、底鋼板は継手板に比べて薄肉であるため、底鋼板から継手板に伝達される曲げモーメントは無視した。このモデルから、てこ反力係数  $\beta (= R/P_f)$  は下式により求まる。

$$\beta = L_1/L_2 \quad (1)$$

式(1)により算定したてこ反力係数  $\beta$  を表-2に記載する。これによれば、中詰めコンクリートのない供試体 (B-1~B-4) では、計算値と実験値は概ね一致しているが、中詰めコンクリートを有するC-1では、実験値が計算値を1割程度上回る結果となった。

てこ反力によるボルトの挙動を調査するため、ボルトの上下面のひずみ計測結果を図-9に示す。ボルト下面のひずみに着目すると、B-1とB-2が、また、B-3とB-4が、それぞれ同様のひずみ挙動を示しており、さらに、同一荷重レベルにおいて前者が後者のひずみを上回る結果となった。これは、最大耐力から求めた表-2に示すてこ反力係数の傾向と一致している。一方、ボルト上面のひずみに着目すると、継手板厚の小さなB-2は、他の供試体に比べて比較的載荷初期の段階から圧縮ひずみが生じている。これは、継手板の剛性が小さいため、継手板が載荷初期の段階から面外変形したことによるものと考えられる。

中詰めコンクリートによる影響を調査するため、B-1とC-1のボルトの上下面に生じたひずみを図-10に示す。なお、C-1では、中詰めコンクリート等の影響によ

表-2 てこ反力係数

ケース名	継手板厚 $t_j$ (mm)	ボルト中心-底鋼板上面距離 $a_1$ (mm)	ボルト中心-継手板上端距離 $a_2$ (mm)	中詰めコンクリート	てこ反力係数	
					実験値	計算値
B-1	16	47	29	無し	1.64	1.72
B-2	9	47	29	無し	1.56	1.72
B-3	16	47	47	無し	1.09	1.06
B-4	16	36	36	無し	1.09	1.08
C-1	16	47	29	有り	1.91	1.72

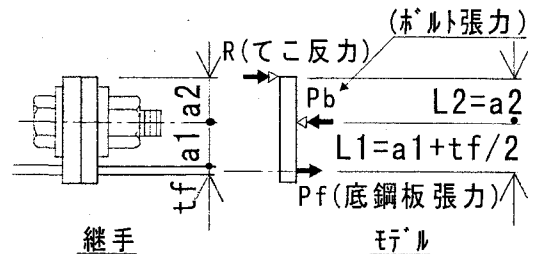


図-8 てこ反力算定モデル

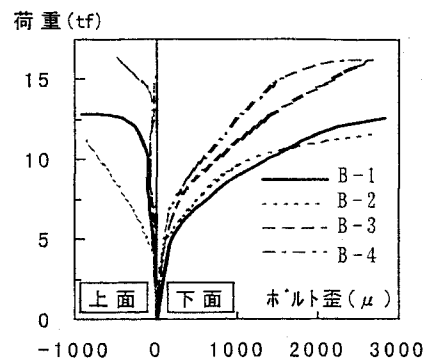


図-9 載荷荷重とボルトひずみ

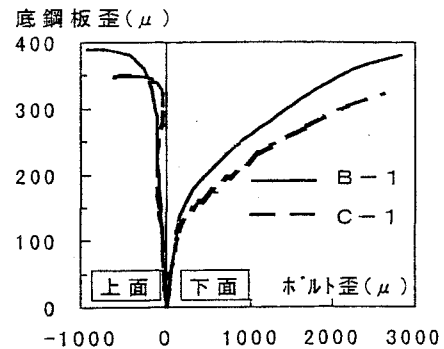


図-10 底鋼板ひずみとボルトひずみ

り載荷荷重と底鋼板に生じる引張力とが一致しないため、本図では縦軸を底鋼板平均ひずみとした。C-1のボルト下面ひずみをB-1と比較すると、底鋼板ひずみが小さいレベルでは、両者は概ね一致しているが、底鋼板ひずみが100  $\mu$  を越えるとC-1のひずみの方が大きくなっており、C-1のてこ反力係数がB-1より大きいことを裏付ける結果となった。なお、C-1のボルトひずみが増加した原因については、中詰めコンクリート等の影響により継手部に生じる応力伝達経路が変化したことが考えられ、検討課題である。

次に、継手板下端の目開き量を図-11に示す。これ

より、目開き量が小さいのは、継手板厚  $t_j$  が大きい (B-1, B-2)、ボルト位置から継手板上端までの距離  $a_2$  が大きい (B-1, B-3)、ボルト位置から底鋼板上表面までの距離  $a_1$  が小さい (B-3, B-4)、等の場合であった。

通常の活荷重レベルでの本床版継手部に生じる目開き量は、図-11の初期勾配範囲と考えられる。そこで、この範囲における目開き量の算定を試みた。算定方法として以下の2案を考えた。

- ① ボルト位置を固定端とした片持ち梁モデル (以下Fモデルと呼ぶ)
- ② ボルトを引張ばねとし、てこ反力の作用は支圧力のみ伝達する支点を継手板に分布させたモデル (以下Sモデルと呼ぶ)

なお、Sモデルに採用するボルトの引張ばね定数は、継手板に離間が生じる前のボルトばね<sup>5)</sup>で評価した。表-3に(目開き量/荷重)の実験値と計算値を示す。なお、実験値は、ボルト下面ひずみの荷重-ひずみ曲線において、その勾配が変化するときの荷重  $P_0$  と、 $P_0$  の70%荷重 ( $0.7P_0$ ) の2つの荷重に対する割線勾配をそれぞれ求めた。ここで、C-1では、てこ反力と同様に、底鋼板のひずみ測定結果から荷重を算定している。

表-3において、B-1~B-4の  $0.7P_0$  の実験値がSモデルの計算値と概ね一致していることが判る。一方、中詰めコンクリートを有するC-1では、 $0.7P_0$  での実験値がB-1に比べて半分以下と小さいが、 $P_0$  の実験値ではB-1との差が小さくなっている。これは、 $0.7P_0$  ~  $P_0$  に移行する過程で中詰めコンクリートにクラックが生じ、コンクリートによる継手板への拘束効果が低減して急激に目開き量が増加したためと考えられる。なお、C-1の計算値と比較すると、実験値  $P_0$  がSモデルの計算値と概ね一致する結果となった。

## (2) 静的曲げ載荷実験

載荷荷重と中央鉛直変位との関係を図-12に示す。ここで、継手部の剛性を評価するため、継手位置となる供試体中央に回転ばねを仮定し、実験値と一致するようにはね定数を逆算した。この結果、得られた回転ばね定数は、 $2.48 \times 10^3 \text{tf} \cdot \text{m/rad}$  であった。

実験は、静的引張載荷実験と同様にボルトの破断で破壊した。図-13に底鋼板ひずみとボルトひずみとの関係を示す。この図より、継手板がボルト位置で離間してから、すなわち、ボルトの初期導入軸ひずみに変化が現れてからは、底鋼板から伝達される引張力の約3倍、すなわち、てこ反力係数  $\beta = 2.0$  に相当するボルト軸ひずみ(平均ひずみ)が生じていた。また、このてこ反力係数は、先の静的引張載荷実験のC-1の1.91とも概ね一致している(表-2)。

## (3) 定点疲労載荷実験

引張接合供試体において、変動荷重範囲13tf (T60荷重相当)の繰返し載荷による鉛直変位、継手目開き量、

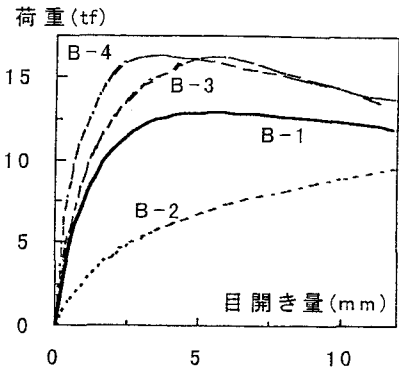


図-11 載荷荷重と継手目開き量

表-3 継手目開き量 (mm/tf)

ケース名	実験値		計算値	
	荷重 $P_0$ 時	荷重 $0.7P_0$ 時	Fモデル	Sモデル
B-1	0.110	0.088	0.056	0.077
B-2	0.620	0.460	0.310	0.370
B-3	0.095	0.078	0.056	0.077
B-4	0.054	0.043	0.029	0.043
C-1	0.086	0.042	0.056	0.077

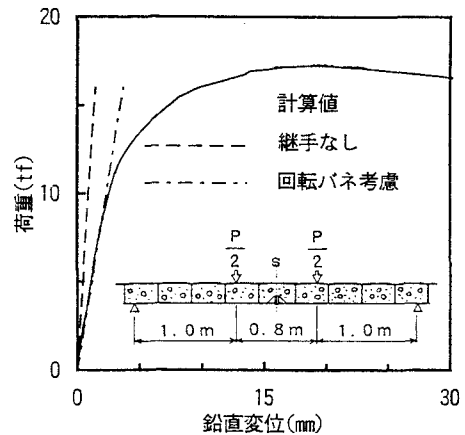


図-12 載荷荷重と中央鉛直変位

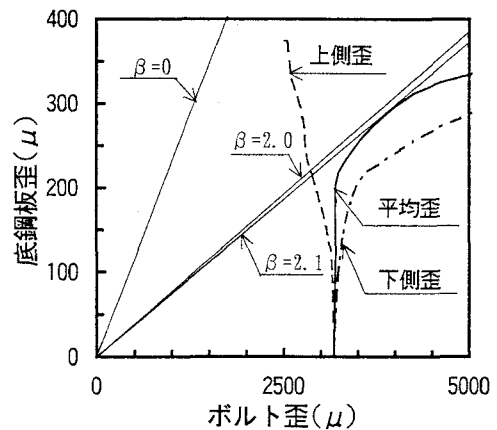


図-13 底鋼板ひずみとボルトひずみ

ボルト軸ひずみの変化を図-14に示す。この結果から、本継手構造は、200万回の載荷に対して各値に疲労劣化を示す挙動は見られず、T60荷重に対して十分な疲労耐久性を有していると考えられ、実用上問題のない継手構

造であるといえる。

同じく引張接合供試体において、中央載荷時の鉛直変位を図-15に示す。ここで、図中の解析値はFEM解析によるもので、スラブパネルと等価な曲げ剛性を与えたシェル要素を用い、継手には先の静的曲げ載荷実験より求めた回転ばね ( $2.48 \times 10^3 \text{tf} \cdot \text{m/rad}$ ) を適用してモデル化した。実験結果は、1回目載荷時と200万回目載荷時の測定値に有意な変化は見られず、疲労劣化していないことが判る。また、解析では、床版に継手を設けることにより中央変位が16%増加しており、実験結果はこの継手を有する解析値とよく一致している。

また、この解析から継手が存在することによる発生曲げモーメントの変化を調査した結果、継手が存在することにより、継手位置での橋軸方向の曲げモーメントが50%以下に減少していた。一方、継手位置橋軸直角方向の曲げモーメントの増加は約10%程度に留まっていた。このように引張ボルト継手の場合には、発生曲げモーメントが継手のない等方性版と異なる値を示しており、本継手を設計する際に考慮すべきであると考えられる。

摩擦接合供試体の繰返し載荷による鉛直変位、継手目開き量の変化を図-16に示す。T60荷重に相当する変動荷重範囲5.6tfの繰返し載荷において、載荷回数10~100回の間には鉛直変位および継手目開き量ともわずかに増加傾向が見られたが、その後の200万回の載荷に対して疲労劣化を示す増加傾向は見られず、また、添接板部に疲労亀裂等も確認されなかった。その後、変動荷重範囲を8.4tf(当初の1.5倍)に上げた繰返し載荷を100万回実施したがそれでも変状が見られず、さらに変動荷重範囲を11.2tf(当初の2倍)として実施後、36万回経過したときに添接板と底鋼板との間に大きなずれが生じ、添接板が破断した。以上の結果から、本継手形式はT60荷重を十分上回る疲労耐久性を有しているといえる。

## 5. おわりに

今回の試験結果から以下のことが考察できた。

- ① 中詰めコンクリートの無い場合の引張ボルト接合にて反力は、継手板上端をてこ反力作用位置とするモデルで算定できる。
- ② 中詰めコンクリートがある場合は、無い場合よりも、てこ反力が大きくなる方向にある。
- ③ 中詰めコンクリートの無い場合、目開き量の初期勾配は、ボルトばねを考慮した梁モデルで継手板を評価することにより算定可能である。
- ④ 定点疲労載荷実験により、高力ボルト引張接合および片面添接高力ボルト摩擦接合とも、T60荷重に対して十分な疲労耐久性を有する。

謝辞：実験に際して大阪大学工学部松井繁之教授から貴重な助言を頂いたことを記し、謝意を表します。

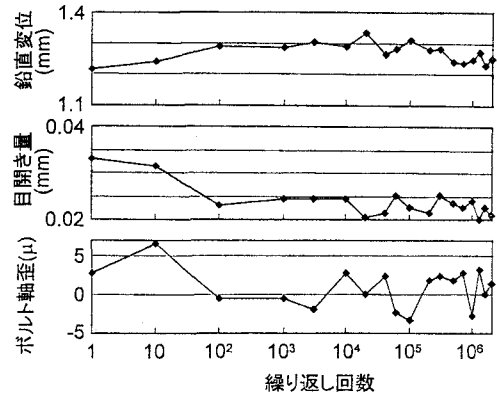


図-14 繰返しによる変化 (引張ボルト)

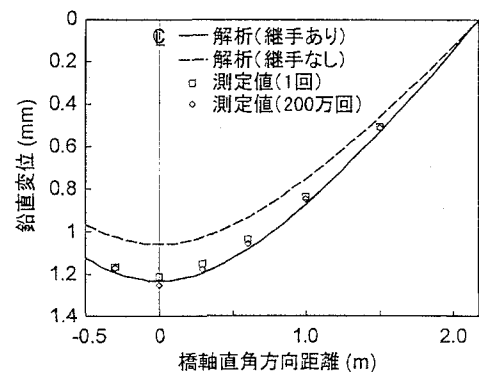


図-15 鉛直変位分布 (引張ボルト)

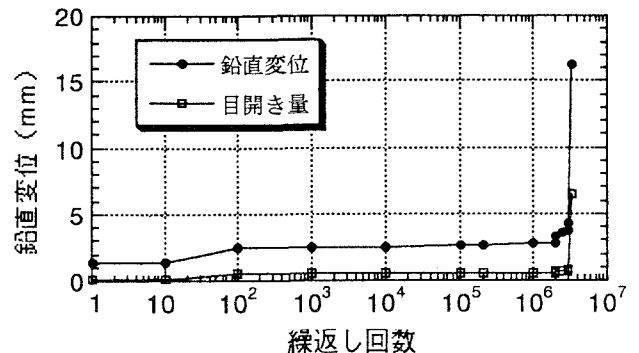


図-16 繰返しによる変化 (摩擦ボルト)

## 参考文献

- 1) 阿部幸夫、柳本泰伴、井澤衛、中川敏之：サンドイッチ型複合床版の力学的挙動、鋼構造年次論文報告集、第4巻、pp.477-484、1996年11月
- 2) 柳本泰伴、阿部幸夫、井澤衛：サンドイッチ型複合床版の継手強度特性、土木学会第52回年次学術講演会、I-A172、pp.342-343、1997年9月
- 3) 柳本泰伴、阿部幸夫、井澤衛：サンドイッチ型複合床版引張ボルト継手の強度特性、土木学会第53回年次学術講演会、CS-23、pp.44-45、1998年10月
- 4) (社)日本鋼構造協会：橋梁用高力ボルト引張接合設計指針(案)、1994年
- 5) 早稲田大学工学部土木工学科村上研究室：セグメント設計法に関する研究、1979年