

アルミニウム合金板摩擦接合継手の疲労特性

ALST 研究レポート 8

2009 年 3 月

大阪大学大学院工学研究科

大倉一郎, 西田貴裕

概要

本研究では、アルミニウム床版を被締結材とした鋼製高力ボルトによる摩擦接合継手の疲労特性を明らかにする。アルミニウム床版の現場継手を試作し、その継手強度試験および疲労試験を実施し、その疲労特性を明らかにする。次に、添接板の摩擦面に施されるブラスト処理が疲労強度に与える影響を明らかにする。最後に、1列ボルトの摩擦接合継手の疲労試験を実施する。

疲労亀裂は、ボルト孔の縁ではなくて、鋼製高力ボルトの座金と添接板の接触跡の縁、および添接板と母材の接触跡の縁に発生する。これらは、接触跡の縁のこすれによるフレット疲労によるものである。ボルトに与えられる初期導入軸力の大きさ、応力比および添接板の厚さが疲労強度に与える影響を明らかにする。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金 基盤研究（B）（研究期間 2007 年度～2008 年度，課題番号 19360202，研究課題名：アルミニウム床版による軽量橋の実現）の研究費補助金を受けた。

ブラスト処理が施された添接板の疲労試験は萩澤亘保氏（日本軽金属㈱グループ技術センター 主任研究員）に実施していただきました。ここに記して，御礼申し上げます。

目次

第 1 章 序論	1
第 2 章 部材端継手の継手強度	3
2.1 試験体	3
2.2 試験体の特性値	4
2.3 試験結果	6
第 3 章 現場継手の疲労特性	8
3.1 部材端継手の疲労試験	8
3.1.1 試験体	8
3.1.2 試験結果	10
3.2 側辺継手の疲労試験	13
3.2.1 試験体	13
3.2.2 試験結果	16
第 4 章 ブラスト処理が施された添接板の疲労強度	18
4.1 試験片	18
4.2 試験結果	19
第 5 章 1 列ボルトの摩擦接合継手の疲労特性	21
5.1 試験体	21
5.2 試験結果	23
5.2.1 疲労亀裂のタイプ	26
5.2.2 疲労亀裂の発生部位	29
5.2.3 疲労亀裂の発生位置	30
5.2.4 S-N 関係	32
第 6 章 結論	35
参考文献	36

第1章 序論

わが国では、1950年代に建設された多くの道路橋が高齢化、老朽化し、損傷した鉄筋コンクリート床版（以下、RC床版と呼ぶ）の補修・補強ならびに取り替えが行なわれ始めている。さらに1993年の道路構造令の改正により、設計自動車荷重が196kNから245kNに変更されたことにより、RC床版を取り替える場合、現行の道路橋示方書¹⁾を適用すると床版厚が厚くなるため、主桁の補強が必要になる場合がある²⁾。これに対して、RC床版をアルミニウム床版に取替え、床版そのものの重量を減らす方法が考えられている³⁾。アルミニウム床版を用いることにより、RC床版と比較して、床版重量を約1/5に減らすことができる。さらに、従来よりも小型の建設重機で工事を行なえるため、施工時の道路占有面積を抑え、事業を早期に完了することができると考えられる。

このような動きを受けて、図1に示すような開閉断面のアルミニウム床版が開発されてきた⁴⁾。アルミニウム床版では、隣り合う押出型材の上フランジの連結に摩擦攪拌接合（以下、FSWと呼ぶ）が使用されている。FSWとは、1991年にイギリスの溶接研究所で開発された固相接合法の一種で、鉄道車両および航空機など多くの分野で適用されている。図2に示すように、FSWでは互いに突合された一对のアルミニウム合金板の突合せ面に回転工具を挿入し、この回転により生じる摩擦熱によって、アルミニウム合金を塑性流動させ、回転工具を突合せ面に沿って移動させることにより、アルミニウム合金板を接合する。最近では、FSWにより製作された歩道用アルミニウム床版^{5),6)}およびアルミニウム歩道橋^{3),7)}が実用に供されている。



図1 開閉断面のアルミニウム床版

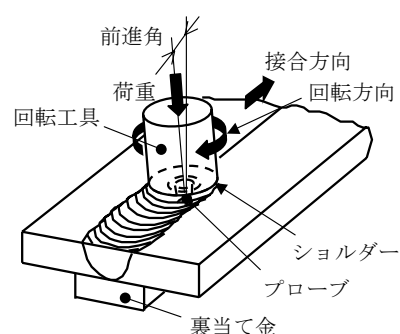


図2 FSW

現在、道路橋用アルミニウム床版の実用化に向けて、アルミニウム床版－鋼桁橋の開発が進められている^{8),9)}。さらに、図3に示すように、2008年8月には道路橋用アルミニウム床版のトラックタイヤ移動載荷疲労試験が行われ、載荷荷重138kN、往復の繰返し回数121.7万回に対して、疲労亀裂が発生せず、道路橋用アルミニウム床版の疲労耐久性が高いことが実証された¹⁰⁾。

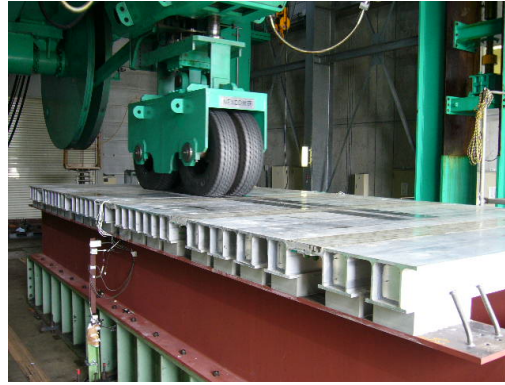


図3 道路橋用アルミニウム床版のトラックタイヤ移動載荷疲労試験

アルミニウム床版を道路橋に適用するためには，図4に示すように，アルミニウム床版の部材端および側辺の現場継手が必要になる．これらの継手を造る方法として，FSW，MIG 溶接，リベット接合およびボルト接合が考えられる．現在，現場で使用できる FSW 装置はまだ開発されていない．MIG 溶接では，溶接部の疲労強度が低いので，道路橋への適用は困難である．リベット接合に関して，社会基盤構造物に必要とされるアルミニウム合金製大径リベットが開発されている¹¹⁾．しかし，開発されたリベットは，冷間状態で，プレス機でかしめ成形されるので，現場での施工は困難である．したがって，鋼製高力ボルトを用いた摩擦接合継手の開発が必要になる．

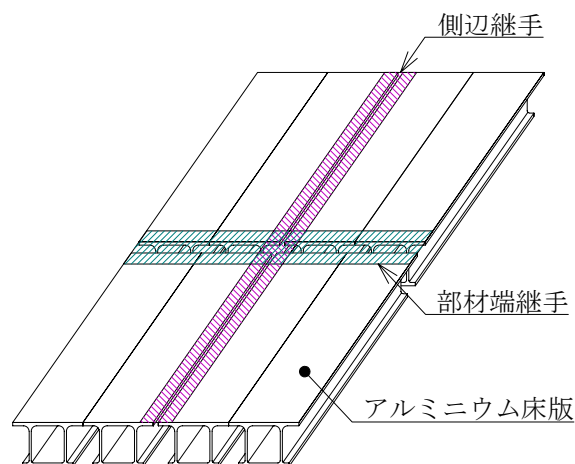


図4 アルミニウム床版の現場継手

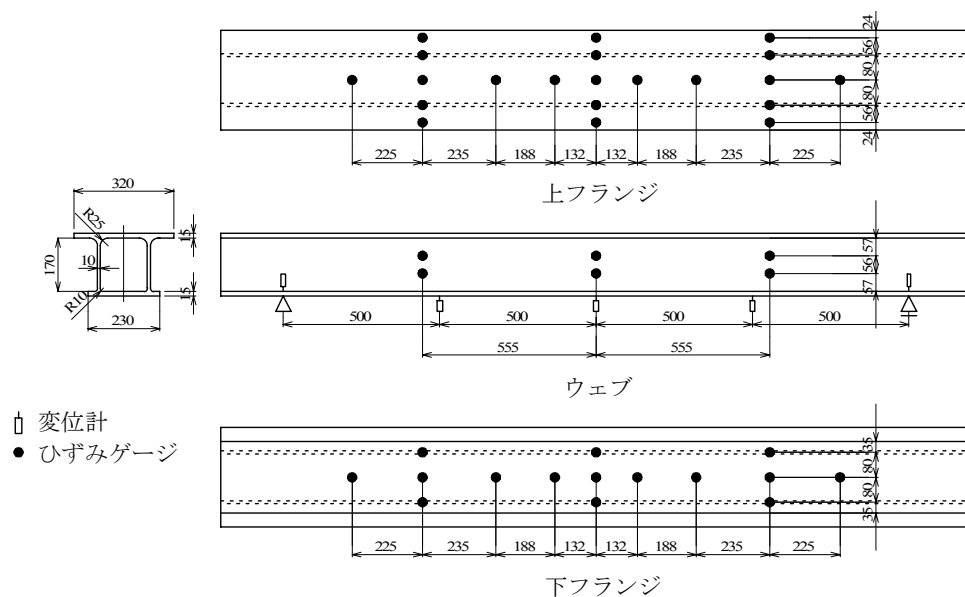
鋼製高力ボルトで締結されたアルミニウム合金板の摩擦接合継手に関して，アルミニウム合金の摩擦面の表面粗さとすべり係数の関係，鋼製高力ボルトの軸力変化と温度変化の関係，および鋼製高力ボルトの初期導入軸力とアルミニウム合金板の表面の変形特性の関係が明らかにされている¹²⁾．

本研究では，アルミニウム床版を被締結材とした鋼製高力ボルトによる摩擦接合継手の疲労特性を明らかにする．アルミニウム床版の現場継手を試作し，その継手強度試験および疲労試験を実施し，その疲労特性を明らかにする．次に，添接板の摩擦面に施されるブラスト処理が疲労強度に与える影響を明らかにする．さらに，1列ボルトの摩擦接合継手の疲労試験を実施し，その疲労特性を明らかにする．

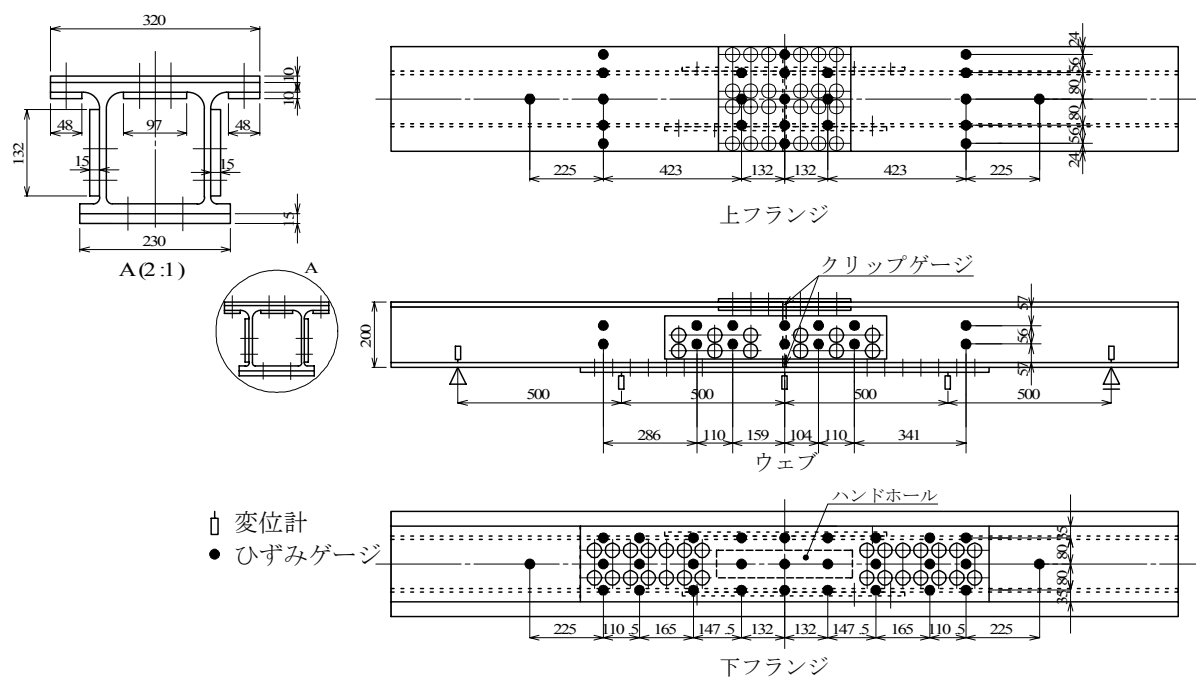
第2章 部材端継手の継手強度

2.1 試験体

部材端継手に関する試験体を図5に示す。同図には2軸のひずみゲージの貼付位置および変位計の設置位置も示してある。図5(a)に示す押出型材の端部が、図5(b)に示すように、鋼製高力ボルトで締結されている。図5の押出型材は、道路橋用アルミニウム床版に使用されるものである⁴⁾。



(a) 基本試験体



(b) 部材端継手試験体

図5 試験体

押出型材と添接板はそれぞれ A6061S-T6 と A6061P-T651 であり, これらの機械的特性を表 1 に示す. 同表の値は, 3 本の引張試験片 (JIS 14B 号) の引張試験によって得られた値の平均値である.

表 1 機械的特性

部材	板厚 t (mm)	引張強さ (MPa)	0.2%耐力 (MPa)	伸び (%)	ヤング係数 (GPa)	ポアソン比
押出型材	15	346	328	11.6	70.6	0.312
JIS 規格値	$6 < t$	265 以上	245 以上	10 以上	—	—
添接板	10	332	315	16.4	71.3	0.317
	15	314	281	16.6	71.0	0.321
JIS 規格値	$6.5 \leq t \leq 13$	295 以上	245 以上	10 以上	—	—
	$13 < t$			9 以上		

アルミニウム合金を被締結材とする摩擦接合継手に関して, 摩擦面の処理方法がアルミニウム建築構造製作要領¹³⁾に規定されている. これによると, 摩擦接合継手において, 1 つのせん断面における相対する両方の摩擦面または一方の摩擦面を, ブラスト処理により, Rz20 μ m 以上の粗面とすることにより, すべり係数を 0.45 とすることが規定されている¹⁴⁾. そこで, 図 5(b) の部材端継手試験体の添接板の摩擦面に表 2 に示すブラスト条件¹²⁾ でブラスト処理を施した. 押出型材の摩擦面にはブラスト処理が施されていない. 測定した表面粗さは Rz30~50 μ m であった.

表 2 ブラスト条件

ブラスト材	アルミナブラスト F60
空気圧力	0.4MPa
使用ノズル	内径 9 mm
吹付け距離	150 mm
吹付け角度	75 度
吹付時間	120 秒/(281×115)mm ² =3.71×10 ⁻³ 秒/mm ²

アルミニウム合金板摩擦接合継手の締結材に鋼製高力ボルトが使用される場合, 異種金属接触腐食を防ぐために溶融亜鉛めっき鋼製高力ボルトが使用される^{14), 15)}. 一般に使用される摩擦接合用鋼製高力ボルトは F10T である. F10T は熱処理により, その強度が得られ, 焼き戻し温度は約 430℃である. 溶融亜鉛めっきは約 500℃で実施されるので, 熱影響により F10T の強度が保証されない場合があるため, 溶融亜鉛めっき鋼製高力ボルトには F8T 相当の軸力が導入される. そこで, 部材端継手試験体に用いた鋼製高力ボルト M22(F10T)に, 道路橋示方書¹⁾に規定される F8T の設計ボルト軸力 165kN の 1 割増しの 182kN の初期導入軸力を与えた.

2.2 試験体の特性値

押出型材の断面形状とその断面性能をそれぞれ図 6 と表 3 に示す.

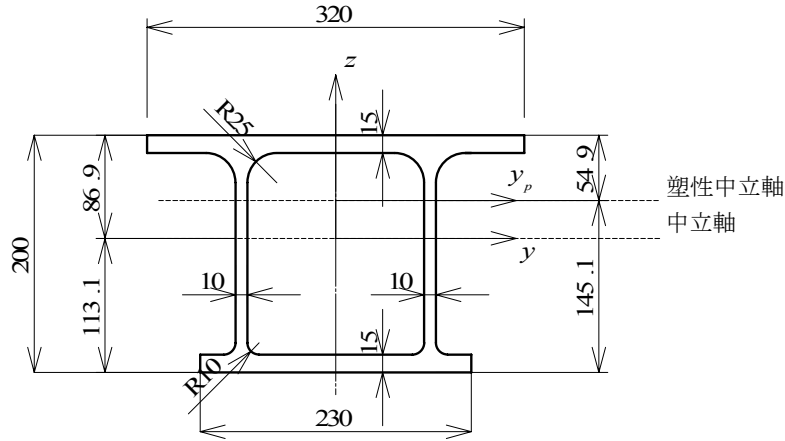


図 6 押出型材の断面形状

表 3 押出型材の断面性能

断面積 $A(\text{mm}^2)$	断面 2 次モーメント		弾性断面係数 $W(\text{mm}^3)$	塑性断面係数 $Z(\text{mm}^3)$
	$I_y(\text{mm}^4)$	$I_z(\text{mm}^4)$		
1.2271×10^4	8.080×10^7	8.198×10^7	7.144×10^5	9.168×10^5

図 5(a) の基本試験体の降伏モーメント $M_{0.2}$ ，降伏荷重 $P_{0.2}$ ，塑性モーメント M_p および塑性荷重 P_p は表 1 と 3 の値を用いて次のように算出される.

$$M_{0.2} = \sigma_{0.2} W = 234323200 \quad \text{N} \cdot \text{mm} \quad (1)$$

$$P_{0.2} = \frac{M_{0.2}}{l} \times 2 = 624861 = 625 \quad \text{kN} \quad (2)$$

$$M_p = \sigma_{0.2} Z = 300710400 \quad \text{N} \cdot \text{mm} \quad (3)$$

$$P_p = \frac{M_p}{l} \times 2 = 801894 = 802 \quad \text{kN} \quad (4)$$

ここに， $\sigma_{0.2}$ ：0.2%耐力， l ：支点から載荷点までの距離 750 mm (図 7 参照).

図 5(b) の部材端継手試験体のすべり荷重 P_s は次のように算出される. すべり荷重に対して摩擦接合継手に作用する曲げモーメント M_s および下フランジに生じる引張力 T_s はそれぞれ次式で与えられる.

$$M_s = \frac{P_s l}{2} \quad (5)$$

$$T_s = \mu P_{re} j n \quad (6)$$

ここに， l ：支点から載荷点までの距離 750 mm (図 7 参照)， μ ：すべり係数 0.45， P_{re} ：初期導入軸力 182kN， j ：摩擦面の数 1 (図 5(b) 参照)， n ：摩擦接合継手の片側のボルト本数 14 (図 5(b) 参照).

作用モーメントと下フランジに生じる引張力のつりあいより，次式を得る.

$$M_s = T_s h \quad (7)$$

ここに， h ：押出型材の高さ 200 mm (図 6 参照).

式(5)と(6)を式(7)に代入して、 P_s について解いて次式を得る．

$$P_s = \frac{2h}{l} T_s = \frac{2h}{l} \mu P_{re} j n = 612 \text{ kN} \quad (8)$$

2.3 試験結果

図 7 に示すように，部材端継手試験体の載荷試験では，上フランジの添接板を避けて載荷を行った．載荷試験の様子を図 8 に示す．

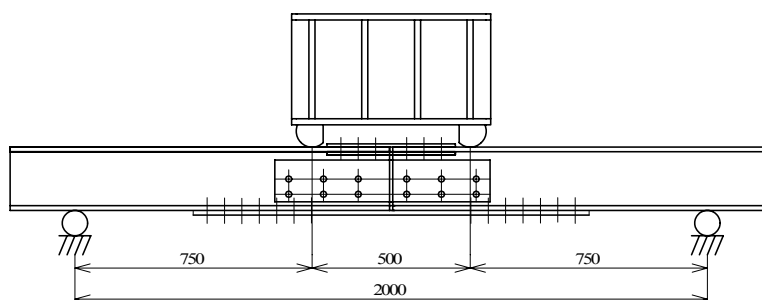
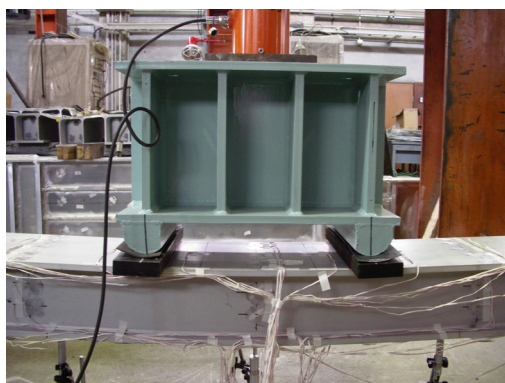


図 7 載荷方法



(a) 基本試験体



(b) 部材端継手試験体

図 8 載荷試験の様子

各試験体の荷重 P と下フランジ下面の中央の鉛直変位 δ の関係を図 9 に示す．同図には基本試験体の降伏荷重 $P_{0.2}$ と塑性荷重 P_p および部材端継手試験体のすべり荷重 P_s がそれぞれ破線，一点長鎖線，二点長鎖線で示されている．基本試験体の最大荷重は塑性荷重 P_p とほぼ一致している．部材端継手試験体では，最初に荷重が下がった時にすべりが発生した．この時の荷重は 583kN であり，部材端継手試験体のすべり荷重 $P_s = 612 \text{ kN}$ の約 95%である．このように，試験時のすべり荷重が P_s より低かったのは，図 5(b)に示すように，ボルト締めのために長いハンドホールが下フランジに設けられ，部材端の突合せ近傍の下フランジに高力ボルトが設けられていないこと，ならびにボルト列数が 7 列と多いことが原因であると考えられる．

以上より，押出型材の部材端継手では，下フランジにハンドホールを設ける必要がなく，2 枚添接板

とすることによりボルト列数を少なくした継手構造を考案する必要がある．

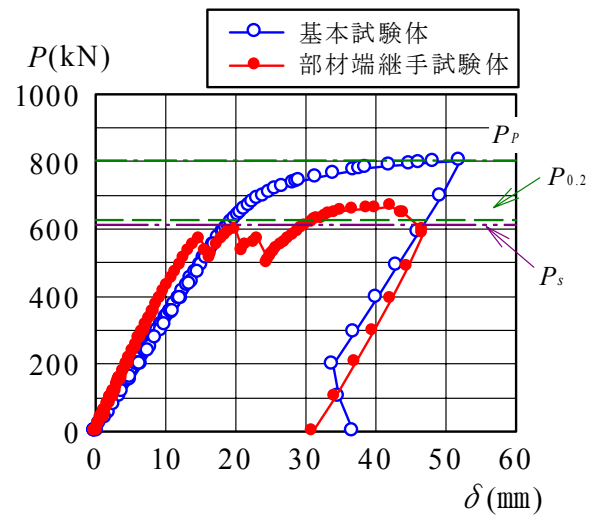


図9 P と δ の関係

第 3 章 現場継手の疲労特性

3.1 部材端継手の疲労試験

3.1.1 試験体

部材端継手の疲労試験体を図 10（次ページ）に示す．同図には 1 軸のひずみゲージの貼付位置および変位計の設置位置も示してある．試験体の継手構造は，第 2 章の部材端継手試験体（図 5(b) 参照）と同じである．荷重方法と疲労試験の様子をそれぞれ図 11，12 に示す．第 2 章の部材端継手試験体の支間長は 2m であったが，疲労試験体の支間長は 1.5m である．疲労試験は，荷重範囲 $\Delta P = 350 \text{ kN}$ ，応力比 $R = 0.054$ ，周波数 1.57Hz で行なった．

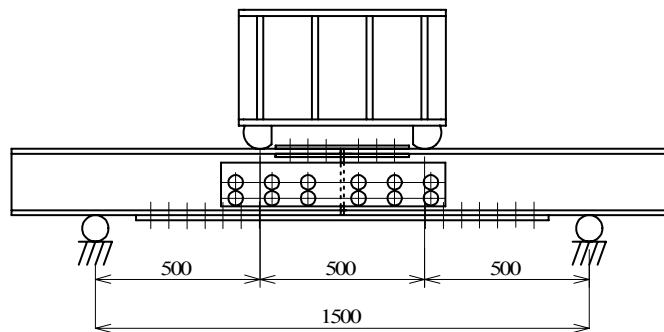


図 11 荷重方法

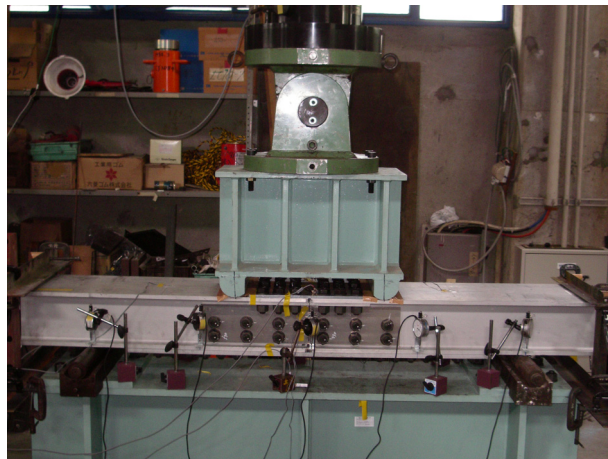
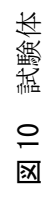


図 12 疲労試験の様子



3.1.2 試験結果

ウェブの添接板と下フランジの添接板に疲労亀裂が発生した。ウェブの添接板と下フランジの添接板のひずみ ε と繰返し回数 N の関係を図 13 に示す。繰返し回数 2.3 万回で、継手中央の突合せ部付近に黒い粉が観察された。

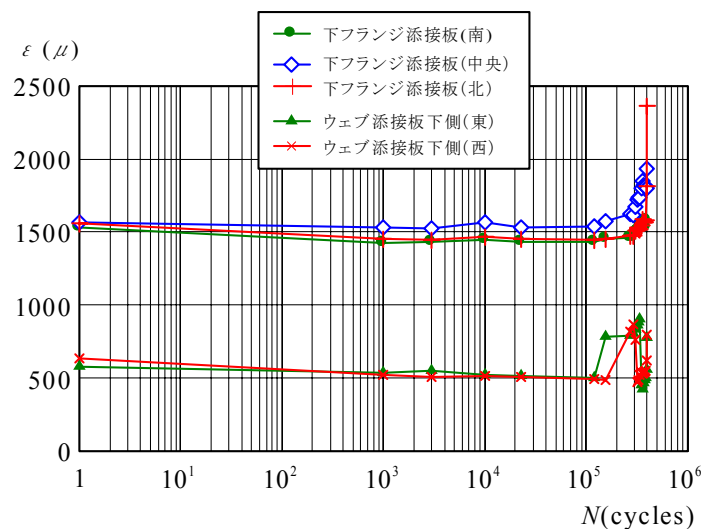


図 13 ひずみ ε と繰返し回数 N の関係

(a) ウェブの添接板

図 13 から分かるように、東側ウェブの添接板では繰返し回数 12 万回以降、西側ウェブの添接板では 15 万回以降ひずみが増加している。そして、27 万回の測定時に両側の添接板において、最内ボルトの突合せ側に疲労亀裂が観察された。東側ウェブの添接板に発生した疲労亀裂を図 14 に示す。東側添接板では 34.7 万回、西側添接板では 31 万回で、疲労亀裂は上部に向かって約 20 mm 進展し、その後 1000 ~ 2000 回で上段のボルトの座金に到達した。

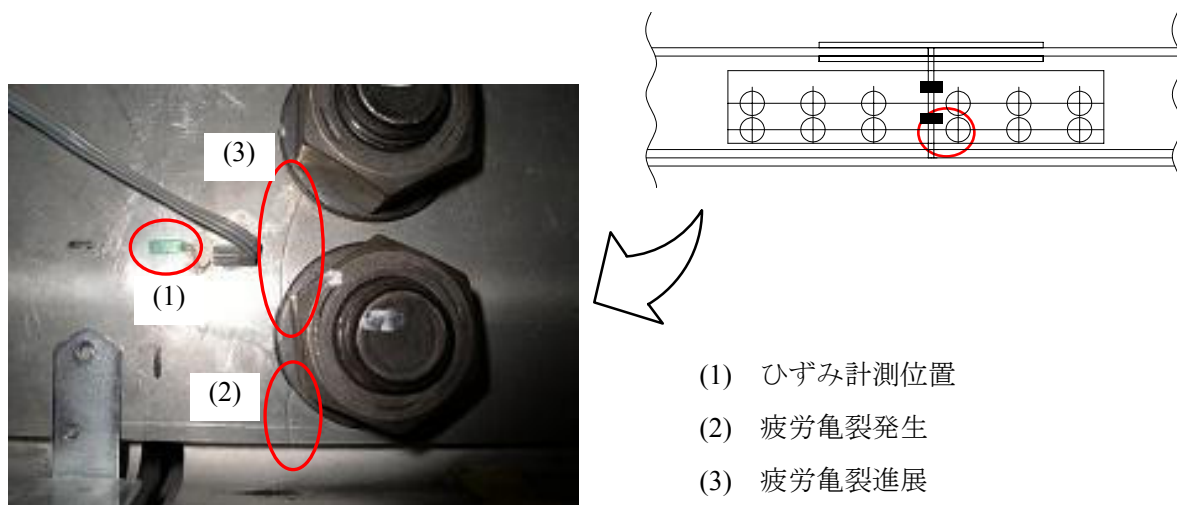


図 14 東側ウェブの添接板に発生した疲労亀裂

12 万回，27 万回，35 万回の各繰返し回数に対して，荷重と，図 14 の東側ウェブの添接板のひずみゲージ位置で計測された応力（計測されたひずみに表 1 のヤング係数を乗じた値）の関係を図 15 に示す．添接板に生じた応力は亀裂発生前約 36MPa であり，これが亀裂発生後（図 14 の(2)の亀裂の状態）約 56MPa に増加し，亀裂進展後（図 14 の(3)の亀裂の状態）約 32MPa に減少した．西側ウェブの添接板の応力も同様の傾向を示した．

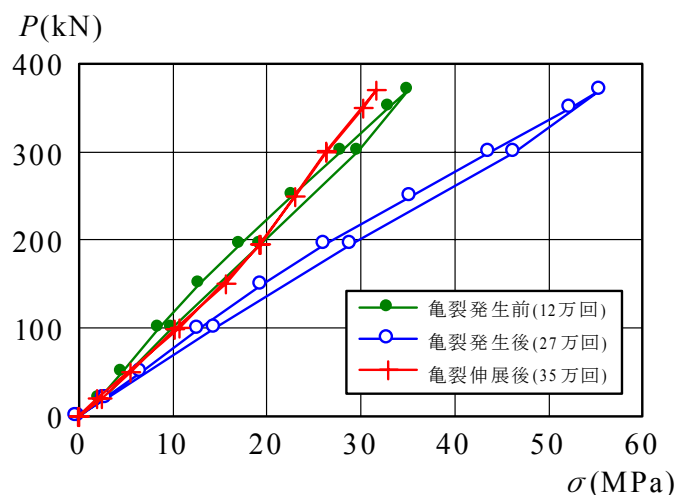


図 15 荷重 P と東側ウェブの添接板に生じる応力 σ の関係

疲労試験終了後の東側ウェブの添接板の様子を図 16 に示す．疲労亀裂はボルト孔の縁に発生していない．図 16(a)に示すように，座金に接触する添接板の表面，および図 16(b)に示すように，ウェブに接触する添接板の摩擦面側表面にはほぼ円形の接触跡が残されている．この円形の接触跡の縁には黒い粉が付着している．EPMA（X 線マイクロアナライザ）による，この黒い粉の化学成分の分析結果を表 4 に示す．この分析は，日本軽金属株式会社グループ技術センターによって行なわれた．黒い粉は O の含有量が多く，ペーマイトと呼ばれるアルミニウム合金の水酸化物 $\text{AlO}(\text{OH}) \cdot \text{H}_2\text{O}$ である．C は添接板に付着した油分によるものである．疲労試験の繰返し载荷により，座金と添接板の円形の接触跡の縁および添接板とウェブの円形の接触跡の縁で微小な相対すべりが繰返し生じることにより，アルミニウム合金が磨耗し，磨耗によって生じた粉は空气中で酸化される．この粉は粒径が小さいので，光が反射されず，吸収されるため黒色になる．疲労亀裂は，この円形の接触跡の縁に沿って発生・伝播している．したがって添接板に発生した疲労亀裂は，接触面の縁がこすられることによって，磨耗による表面損傷を伴うフレット疲労によるものである．しかし図 16 の疲労亀裂は，添接板の表面と裏面から独立に発生したものなのか，どちらか一方の面から発生した亀裂が他方の面に現れたものなのかは不明である．



(a) 表面（座金側）



(b) 裏面（摩擦面側）

図 16 東側ウェブの添接板の様子

表 4 黒い粉の化学成分（質量）

Al(%)	O(%)	C(%)	Mg(%)	Si(%)	Cu(%)	Fe(%)	Cr(%)	Ti(%)
52	43	2	0.9	0.6	0.6	0.3	0.2	0.1

(b) 下フランジの添接板

図 13 に示すように、ウェブの添接板のひずみの増加に伴って、下フランジの添接板のひずみも増加した。繰返し回数 40.06 万回で大きな金属音が発生し、下フランジの添接板の最内ボルトの突合せ側に、図 17 に示すような疲労亀裂が発生した。

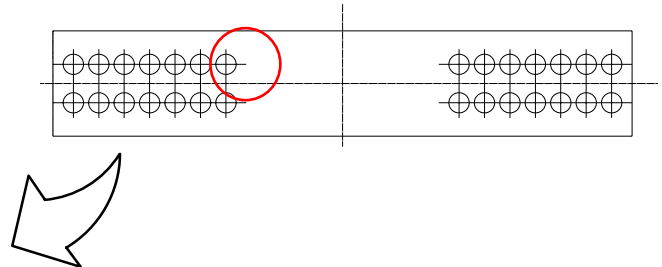


図 17 下フランジの添接板に発生した疲労亀裂

作用荷重 $P=370\text{ kN}$ に対する下フランジの応力分布を図 18 に示す。繰返し回数 27 万回は、疲労亀裂がウェブの添接板に観察されたとき、繰返し回数 35 万回は、疲労亀裂がウェブの添接板の上段のボルトの座金に到達したときである。図 18 から分かるように、下フランジの添接板の中央には、ウェブの添接板に亀裂が発生する前に 110MPa の応力が生じており、ウェブの添接板の亀裂が進展した後、 126MPa に増加している。

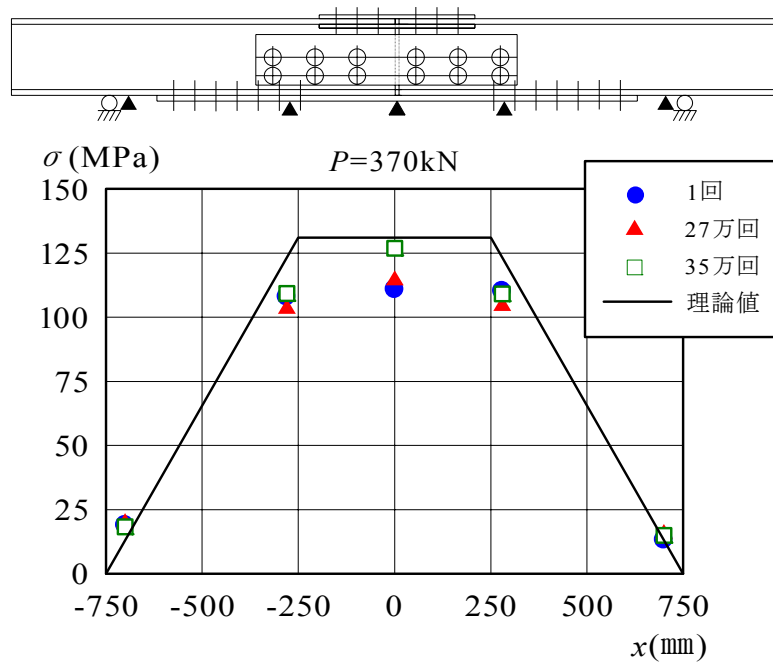
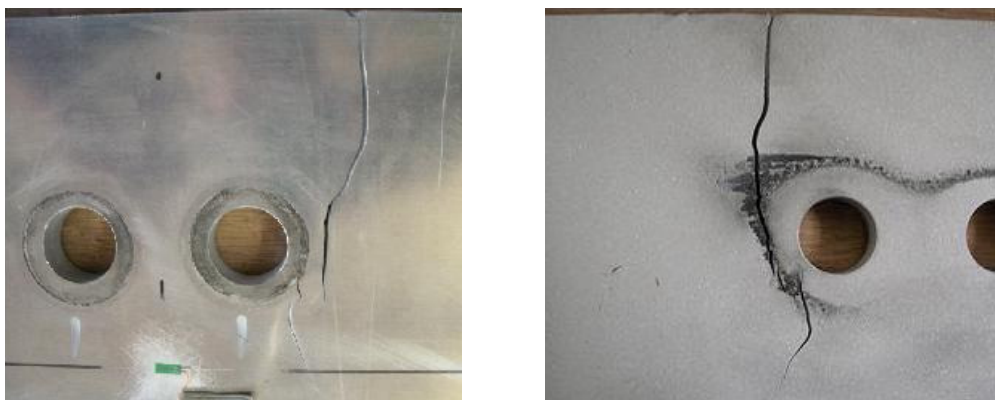


図 18 下フランジの応力分布

疲労試験終了後の下フランジの添接板の様子を図 19 に示す。疲労亀裂は、ボルトの円孔の縁に発生していない。添接板の表面と裏面に、座金および下フランジとの接触による円形の接触跡が残され、接触跡の縁に黒い粉が付着している。添接板には二つの疲労亀裂が発生している。図 19(a) に示すように、一つは、表面の接触跡の縁に発生し、他方は、表面の接触跡の縁の外側に発生している。後者の亀裂は、図 19(b) に示すように、裏面の接触跡の縁に発生した亀裂が表面に現れたものである。両者はフレットング疲労によるものであり、表面および裏面から独立に発生した。



(a) 表面（座金側）

(b) 裏面（摩擦面側）

図 19 下フランジの添接板の様子

3.2 側辺継手の疲労試験

3.2.1 試験体

側辺継手の疲労試験体を図 20（次ページ）に示す．同図には，2 軸のひずみゲージの貼付位置および変位計の設置位置，さらには荷重の載荷位置が示してある．使用したアルミニウム合金，高力ボルトおよび添接板のブラスト条件は，第 2 章の部材端継手試験体（図 5(b) 参照）と同じである．荷重の載荷パターンを表 5 に示す．同表の衝撃荷重に対して，荷重範囲に対して 0.4 の衝撃係数が考慮されている．最初に開断面上載荷で， $\Delta P = 50 \text{ kN}$ を 200 万回繰返し載荷した後， $\Delta P = 70 \text{ kN}$ を 500 万回繰返し載荷した．次に，開断面上載荷と同じ載荷パターンの荷重を同じ試験体の閉断面上に与えた．

表 5 載荷パターン

載荷パターン		最大荷重 $P_{\max} \text{ (kN)}$	最小荷重 $P_{\min} \text{ (kN)}$	荷重範囲 $\Delta P \text{ (kN)}$	応力比 R	繰返し回数 $N \text{ (万回)}$
開断面上載荷	輪荷重	52	2	50	0.038	200
	輪荷重+衝撃荷重	72	2	70	0.028	500
閉断面上載荷	輪荷重	52	2	50	0.038	200
	輪荷重+衝撃荷重	72	2	70	0.028	500

図 21 を参照して，トラックタイヤの接地半径 r と荷重 P_1 の関係が次式で与えられる¹⁶⁾．

$$r = \sqrt{\frac{\alpha_1 P_1 + \alpha_2}{\pi}} \quad (2.5 \text{ kN} \leq P_1 \leq P_{1cr}) \quad (9)$$

$$r = \frac{1000 P_1}{485.7(\alpha_3 P_1 + \alpha_4)} + 33.7 \quad (P_{1cr} \leq P_1 \leq 50 \text{ kN}) \quad (10)$$

ここに， P_{1cr} ：トラックタイヤの接地形状が円形から樽形に変わる臨界荷重， α_1 ， α_2 ， α_3 ， α_4 ：係数．

トラックタイヤの標準空気圧 700kPa に対して，アルミニウム床版の開断面と閉断面に対する P_{1cr} ， α_1 ， α_2 ， α_3 ， α_4 の値を表 6 に示す¹⁶⁾．

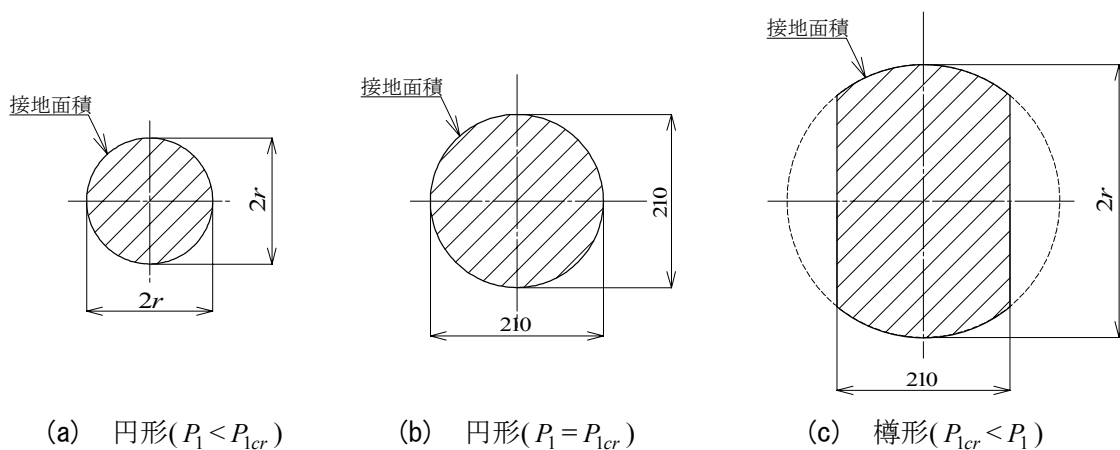


図 21 トラックタイヤの接地半径 r と荷重 P_1 の関係

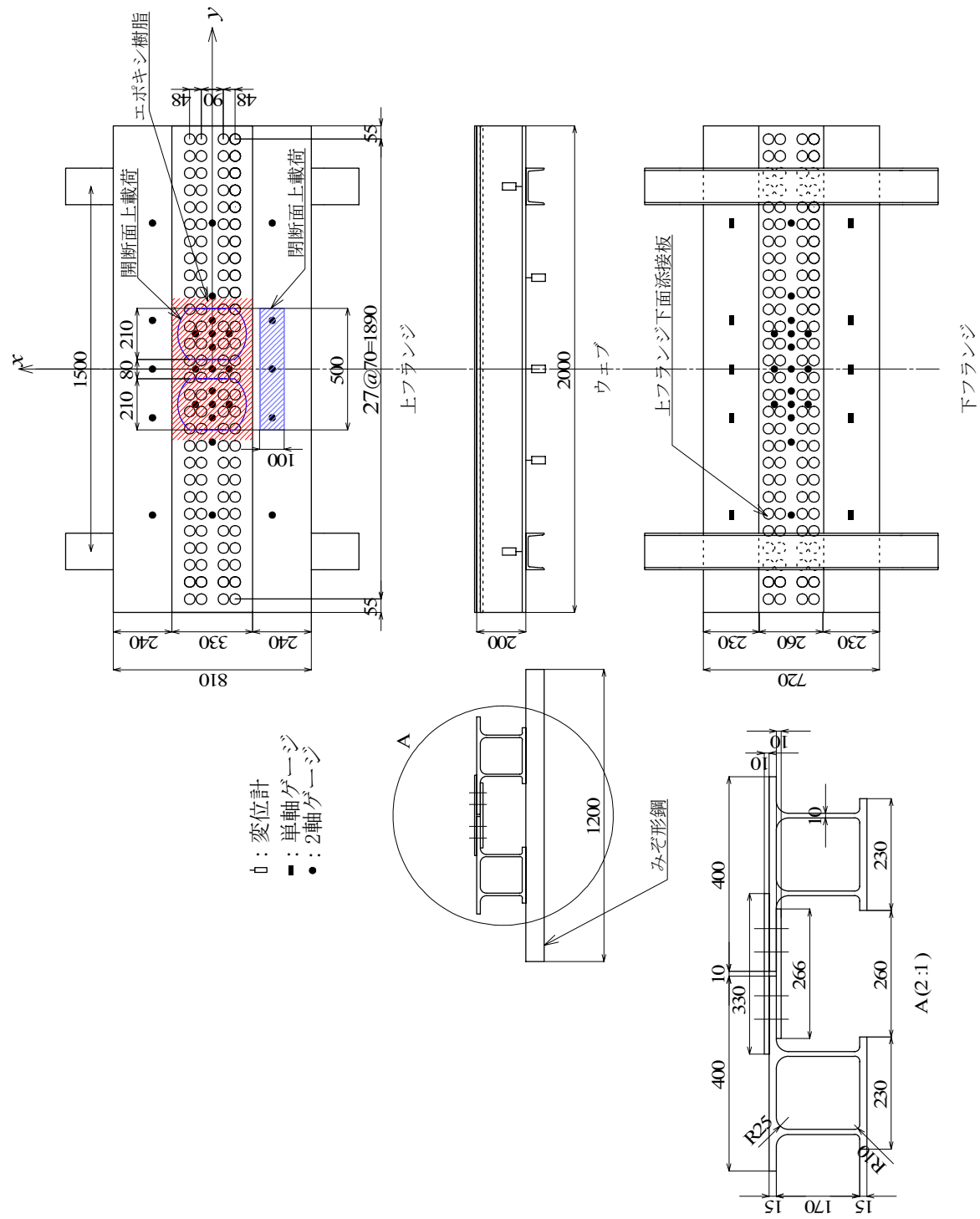


図 20 試験体

表 6 P_{lcr} , α_1 , α_2 , α_3 , α_4 の値

記号	載荷位置	
	開断面	閉断面
P_{lcr} (kN)	19.4	20.2
α_1	1613	1613
α_2	3299	2838
α_3	7.430×10^{-3}	7.405×10^{-3}
α_4	0.414	0.422

表 5 の最大値 $P_{\max}$ に対して, $P_1 = P_{\max}/2$ を用いて, 式(10)から算出されるトラックタイヤの接地形状を図 22 に示す.

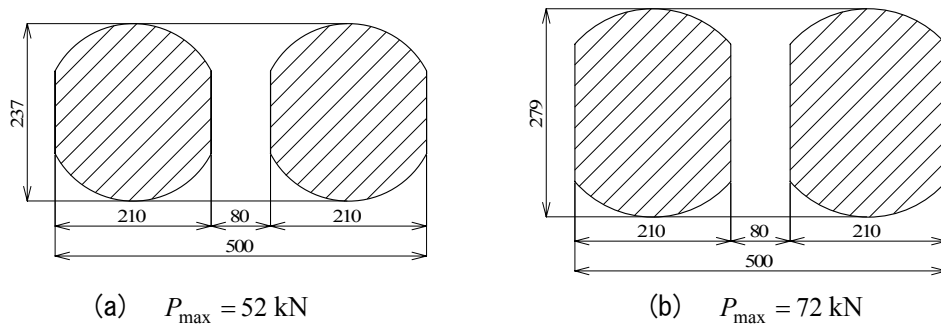


図 22 最大値 $P_{\max}$ に対するトラックタイヤの接地形状

開断面上載荷では, 側辺継手上にエポキシ樹脂を敷き, その上に図 22 のトラックタイヤの接地形状の鉄板を置き, 荷重を載荷した. 閉断面上載荷では, 図 22 のトラックタイヤの接地形状の鉄板が試験体の外に出るため, 500 mm×100 mmの長方形の領域に荷重を載荷した. 疲労試験の様子を図 23 に示す.

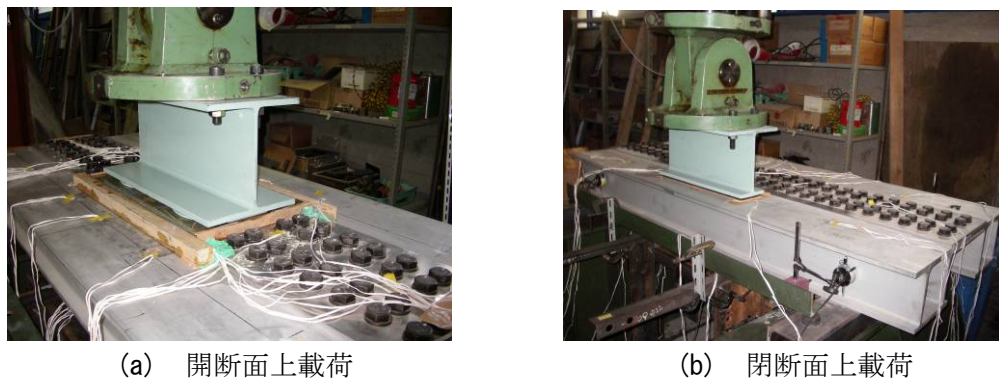


図 23 側辺継手の疲労試験

3. 2. 2 試験結果

開断面上載荷および閉断面上載荷ともに疲労亀裂は発生しなかった. 上フランジ下面の添接板中央の

橋軸方向応力 σ_x および橋軸直角方向応力 σ_y と繰返し回数 N の関係をそれぞれ図 24, 25 に示す. 開断面上載荷では, 載荷回数が増えるほど, 添接板とエポキシ樹脂との間に空隙ができたために, 添接板に生じる応力に変化が見られた.

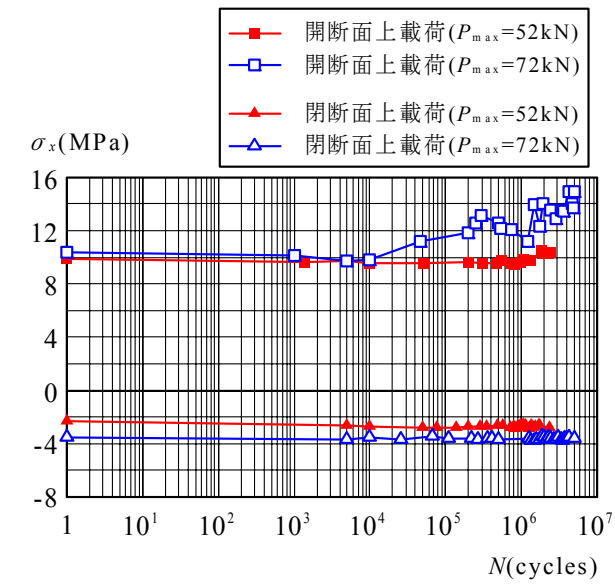


図 24 σ_x と N の関係

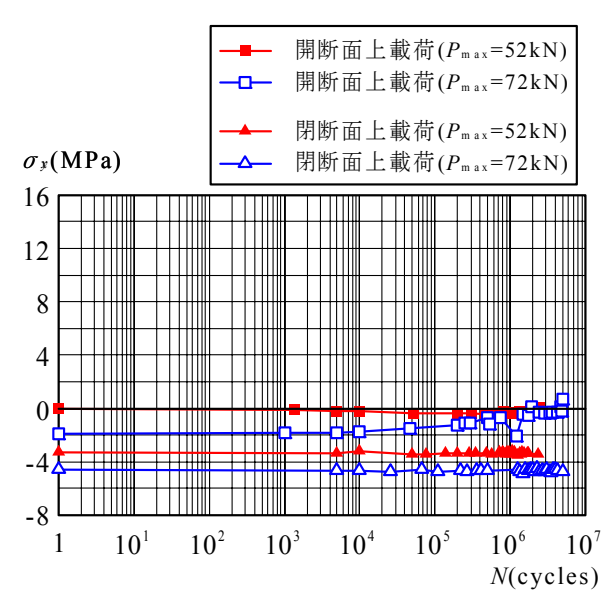


図 25 σ_y と N の関係

第 4 章 ブラスト処理が施された添接板の疲労強度

4.1 試験片

添接板の摩擦面に施されたブラスト処理によって付けられた凹凸が添接板の疲労強度に与える影響を明らかにするために、図 26 に示す試験片の疲労試験を行った。試験片の板厚は 8 mm，使用したアルミニウム合金は A6061P-T651 である。試験片の種類を表 7 に示す。試験片 C と D においては、面取り作業の際に使用される加工油がブラスト面に付着するのを防ぐために、ブラスト処理が行なわれる前に面取り作業が行なわれた。図 27 に示すように、試験片 D では平行部の材縁から 5 mm 内側にブラスト処理が行なわれた。

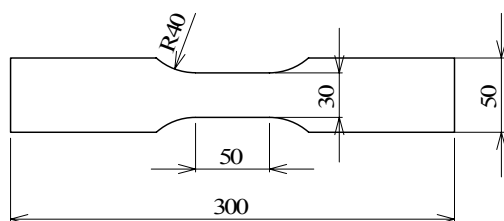


図 26 試験片の形状

表 7 試験片の種類

試験片	角の面取り	ブラスト処理
A	なし	なし
B	1 mm	なし
C	1 mm	全面
D	1 mm	図 27 の斜線部分

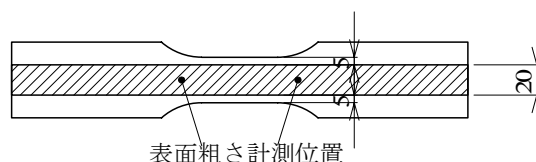


図 27 試験片 D のブラスト処理

試験片に対するブラスト処理は、すべり係数 0.45 を得るために必要とされる表面粗さ $Rz20\mu m$ 以上を確保するために^{13),14)}、表面粗さが $Rz30\sim50\mu m$ となるようなブラスト処理を行なった。使用したブラスト材はアルミナ#46，ノズルの内径 9.9 mm である。ブラスト処理後の、図 27 に示す位置の表面粗さの計測結果を表 8 に示す。

表 8 試験片のブラスト処理後の表面粗さ (Rz)

試験片	左側	右側	平均
C	42	41	42
D	46	40	43

試験片に使用されたアルミニウム合金 A6061P-T651 の化学成分を表 9、3 本の引張試験片 (JIS 14B 号) の引張試験によって得られた機械的特性を表 10 に示す。

表 9 化学成分

参照	Si(%)	Fe(%)	Cu(%)	Mn(%)	Mg(%)	Cr(%)	Zn(%)	Ti(%)
ミルシート	0.60	0.43	0.27	0.02	0.99	0.12	0.01	0.04
JIS 規格値	0.40 ～0.8	0.7 以下	0.15 ～0.40	0.15 以下	0.8～ 1.2	0.04 ～0.35	0.25 以下	0.15 以下

表 10 機械的特性

	引張強さ (MPa)	0.2%耐力 (MPa)	伸び (%)	ヤング係数 (GPa)	ポアソン比
試験値 (平均値)	330	314	16.0	70.7	0.32
JIS 規格値	295 以上	245 以上	10 以上	—	—

4.2 試験結果

応力比 R が 0.1 で疲労試験を行った。疲労試験の結果を表 11, S-N 関係を図 28 に示す。同図には、次式で与えられる S-N 曲線も示してある。

$$\log N = \log c - m \log(\Delta\sigma) \quad (11)$$

ここで、 $\log c$ と m は疲労試験の結果に最小 2 乗法を適用することによって得られた値であり、それらの値を表 12 に示す。さらに同表には次式で計算される、任意の $\log(\Delta\sigma)$ に対する $\log N$ の標準偏差 ξ_N も示してある。

$$\xi_N = \left[\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n \{ \log N_i - \log c + m \log(\Delta\sigma_i) \}^2 \right]^{0.5} \quad (12)$$

ここに、 $\Delta\sigma_i$ と N_i : それぞれ、試験片 i の応力範囲と繰返し回数、 n : 破断した試験片の総数。

表 11 疲労試験の結果

試験片 A			試験片 B			試験片 C			試験片 D		
$\Delta\sigma$ (MPa)	N (cycles)	破断	$\Delta\sigma$ (MPa)	N (cycles)	破断	$\Delta\sigma$ (MPa)	N (cycles)	破断	$\Delta\sigma$ (MPa)	N (cycles)	破断
260	5.67×10^4		250	9.59×10^4		250	5.91×10^4		250	1.03×10^5	
240	2.12×10^5		220	2.89×10^5		220	1.64×10^6		220	2.79×10^5	
220	1.07×10^6		210	1.66×10^6		200	1.78×10^5		210	6.90×10^5	
200	2.13×10^6		200	1.64×10^6		190	4.46×10^5		200	3.58×10^5	
180	5.19×10^6		190	4.08×10^6		180	1.75×10^5		190	4.13×10^6	
170	9.35×10^6		180	3.81×10^6		170	1.14×10^7	未	180	7.16×10^6	
160	1.08×10^7	未	170	1.35×10^7	未	160	1.12×10^7		170	1.25×10^7	未
			160	1.04×10^7	未	150	1.49×10^7	未	160	1.16×10^7	未

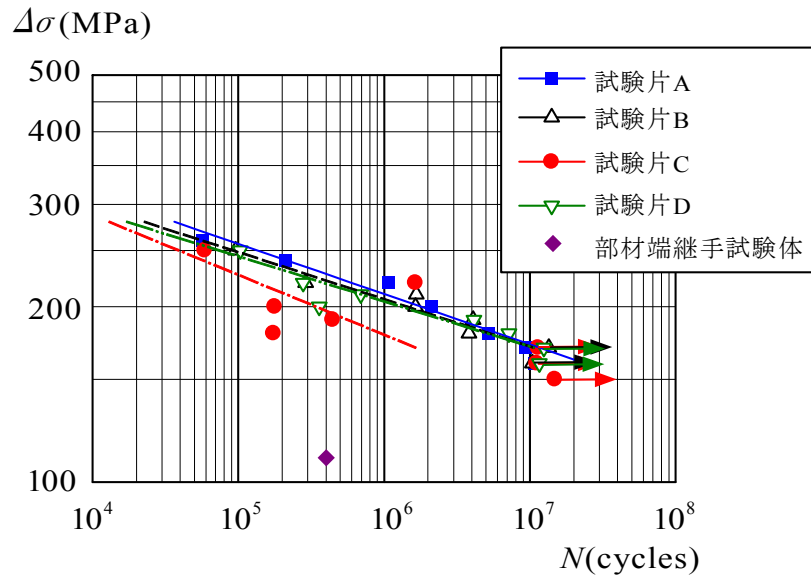


図 28 S-N 関係

表 12 m , $\log c$ および ξ_N の値

試験片	m	$\log c$	ξ_N
A	11.58	32.900	0.172
B	12.36	34.636	0.215
C	7.73	23.442	0.705
D	12.90	35.778	0.323

図 28 から、試験片 C の疲労強度が他のシリーズの試験片のそれらと比べて幾分低く、ばらつきも大きい。これは、試験片の全面にブラスト処理が施されたことにより、試験片の材縁の角の面取りにブラストによる凹凸が付けられたためと考えられる。試験片 D の疲労強度は、ブラスト処理が施されていない試験片 A と B のそれらとほぼ一致しており、材縁から 5 mm 内側にブラスト処理を施すことにより、ブラスト処理が施された添接板の疲労強度の低下を防ぐことができる。

さらに、図 28 には、第 3 章で述べた部材端継手試験体の下フランジの添接板の疲労強度も示してある。部材端継手試験体の下フランジの添接板の摩擦面には全体にブラスト処理が施されている。部材端継手試験体の疲労強度は、試験片 C の疲労強度より格段に低い。したがって、ブラスト処理が部材端継手の疲労強度に与える影響は小さいと言える。

第 5 章 1 列ボルトの摩擦接合継手の疲労特性

5.1 試験体

ボルト本数が片側 1 本の摩擦接合継手の疲労特性を明らかにするために、図 29 に示す試験体の疲労試験を行なった。試験体の種類を表 13 に示す。母材の板厚 t_1 は 8 mm であり、添接板 1 枚の板厚 t_2 は 4, 6 および 8 mm である。母材および添接板のアルミニウム合金は、板厚が 4 mm と 6 mm に対して A6061P-T6, 8 mm に対して A6061P-T651 である。

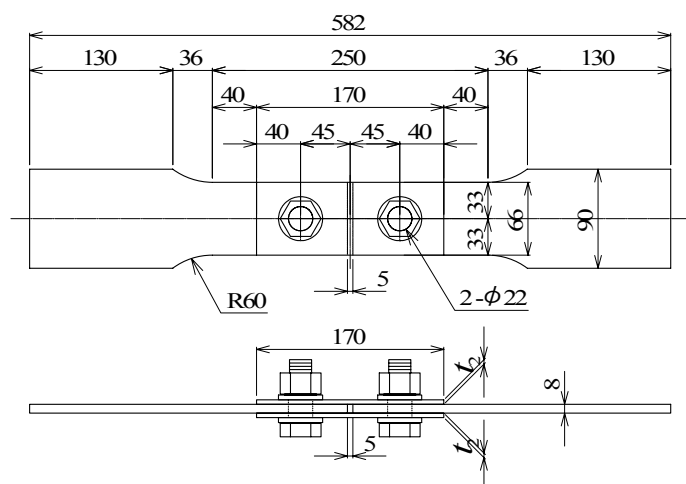


図 29 試験体

表 13 試験体の種類

試験体 シリーズ	母材の板厚 t_1 (mm)	添接板 1 枚の 板厚 t_2 (mm)	初期導入軸力 P_{re} (kN)	応力比 R	数量
FA	8	4	146	0.1	5
FB		4	146	-1	3
FC		4	182	0.1	4
FD		4	182	0.5	4
FE		6	182	0.1	3
FF		8	182	0.1	4

試験体シリーズ FA から FD に使用されたアルミニウム合金材と試験体シリーズ FE, FF に使用されたアルミニウム合金材は異なる。試験体シリーズ FA から FD の化学成分および機械的特性をそれぞれ表 14, 15, 試験体シリーズ FE と FF の化学成分および機械的特性をそれぞれ表 16, 17 に示す。表 14 と 16 の化学成分および表 17 の板厚が 6 mm の機械的特性はミルシート値である。表 15 の機械的特性および表 17 の板厚が 8 mm の機械的特性は、3 本の引張試験片 (JIS 14B 号) の平均値である。

表 14 化学成分（試験体シリーズ FA から FD）

部材	板厚(mm)	Si(%)	Fe(%)	Cu(%)	Mn(%)	Mg(%)	Cr(%)	Zn(%)	Ti(%)
母材	8	0.61	0.43	0.29	0.02	1.04	0.12	0.01	0.04
添接板	4	0.61	0.42	0.28	0.02	1.00	0.11	0.01	0.04
JIS 規格値		0.40～ 0.8	0.7 以下	0.15～ 0.40	0.15 以下	0.8～ 1.2	0.04～ 0.35	0.25 以下	0.15 以下

表 15 機械的特性（試験体シリーズ FA から FD）

部材	板厚 (mm)	引張強さ (MPa)	0.2%耐力 (MPa)	伸び (%)	ヤング係数 (GPa)	ポアソン比
母材	8	322.0	300.6	16.6	71.0	0.33
添接板	4	358.0	319.2	17.7	72.2	0.33
JIS 規格値		295 以上	245 以上	10 以上	—	—

表 16 化学成分（試験体シリーズ FE と FF）

部材	板厚(mm)	Si(%)	Fe(%)	Cu(%)	Mn(%)	Mg(%)	Cr(%)	Zn(%)	Ti(%)
母材と添接板	8	0.61	0.42	0.28	0.03	1.01	0.12	0.01	0.03
添接板	6	0.61	0.42	0.28	0.02	1.00	0.11	0.01	0.04
JIS 規格値		0.40～ 0.8	0.7 以下	0.15～ 0.40	0.15 以下	0.8～ 1.2	0.04～ 0.35	0.25 以下	0.15 以下

表 17 機械的特性（試験体シリーズ FE と FF）

部材	板厚 (mm)	引張強さ (MPa)	0.2%耐力 (MPa)	伸び (%)	ヤング係数 (GPa)	ポアソン比
母材と添接板	8	328.1	303.0	16.7	71.3	0.32
添接板	6	338	308	14	—	—
JIS 規格値		295 以上	245 以上	10 以上	—	—

第 4 章の結果に従って、添接板の摩擦面に対するブラスト処理は、図 30 に示すように、添接板の 4 つの長辺の角を 1 mm 面取りした後に、材縁から 5 mm 内側に離して行なった。使用したブラスト材は第 4 章と同じである。ブラスト処理後の、添接板中央における表面粗さの計測結果を表 18 に示す。すべての添接板に対して計測した表面粗さの、最小値と最大値が示されている。

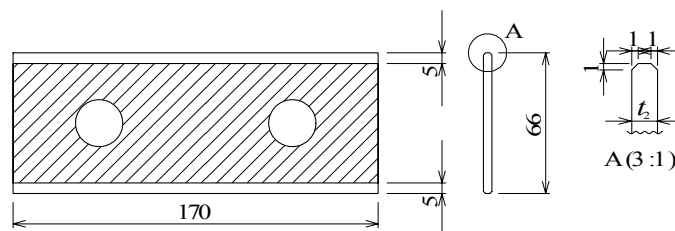


図 30 添接板の面取りとブラスト処理範囲

表 18 ブラスト処理後の添接板の表面粗さ

試験体シリーズ	Rz(μm)
FA から FD	30.2 から 46.0
FE と FF	28.1 から 43.1

試験体の縁端距離はアルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案（第一次改訂試案）¹⁵⁾に従った．同指針に規定される縁端距離を表 19 に示し，縁端距離の算出方法を以下に示す．

- (1) ボルト孔中心からの材端距離 e_1

$$2d \leq e_1 \quad (13)$$

- (2) ボルト孔中心からの材縁距離 e_2

$$1.5\phi \leq e_2 \leq 5.5t \leq 90 \text{ mm} \quad (14)$$

ここに， d ：高力ボルトの呼び径， ϕ ：ボルト孔径， t ：添接板 1 枚の板厚．

表 19 縁端距離

	添接板 1 枚の板厚(mm)		
	4	6	8
材端距離 e_1 (mm)	$40 \leq e_1$	$40 \leq e_1$	$40 \leq e_1$
材縁距離 e_2 (mm)	$33 \leq e_1 \leq 22$	$33 \leq e_1 \leq 33$	$33 \leq e_1 \leq 44$

表 19 に示すように，添接板の板厚が 4 mm の場合，材縁距離の最小値は最大値よりも大きくなる．これは，アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案（第一次改訂試案）¹⁵⁾に不備があることを示している．

試験体に使用した鋼製高力ボルトは M20(F10T)であり，ボルト孔径は 22 mm である．近年，表面にフッ素樹脂皮膜が焼き付けられた鋼製高力ボルトが開発されている¹⁷⁾．このボルトは耐食性に優れ，フッ素樹脂皮膜によってアルミニウム合金板と鋼製高力ボルトが電氣的に絶縁されるので，両者間の異種金属接触腐食を防ぐことができる．フッ素樹脂コート鋼製高力ボルトは強度区分が F10T であり，これをアルミニウム合金板摩擦接合継手に用いることにより，ボルト本数を減らすことができる．そこで，道路橋示方書¹⁾で規定されている F10T の設計ボルト軸力 165kN を 1 割り増した 182kN をボルトの初期導入軸力 P_{re} に与えた．比較として，2.1 節の溶融亜鉛めっき鋼製高力ボルトの初期導入軸力に従って，道路橋示方書¹⁾に規定される F8T の設計ボルト軸力 133kN を 1 割り増した 146kN も考慮した．

試験体シリーズ FA から FD の高力ボルトの座金には，添接板と接触する側の外縁にバリが残されていたが，試験体シリーズ FE と FF の座金の外縁にはバリが残されていなかった．

5.2 試験結果

最大荷重 100kN の油圧式サーボパルス型疲労試験機を用いて疲労試験を行った．疲労試験の様子と結果をそれぞれ図 31，表 20 に示す．

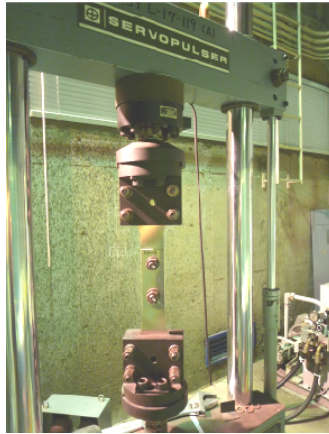


図 31 疲労試験の様子

表 20 疲労試験の結果

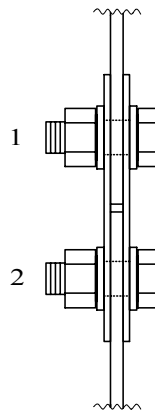
試験体	t_2 (mm)	P_{re} (kN)	R	$\Delta\sigma_1$ (MPa)	繰返し回数	ボ ^{**} ルト	亀裂 タイプ	添接板		母材	r_{c1} (mm)	θ_{c1} (°)	r_{c2} (mm)	θ_{c2} (°)
								ナット 側	ボルト 頭側					
FA-1	4	146	0.1	150	141003	1	I	●	—	—	15.3	45.0	15.5	29.6
FA-2				100	466578	1	I	●	—	—	15.6	29.0	—	—
						1	I	—	◎	—	17.9	28.5	17.2	31.1
FA-3				70	1772431	1	I	◎	—	—	16.6	38.1	—	—
						2	I	◎	—	—	17.8	35.0	16.6	28.6
						1	I	—	●	—	17.5	20.3	15.9	24.6
FA-4				50	7123640	2	I	—	●	—	17.5	32.3	16.8	18.7
FA-5	40	20000000*	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
FB-1	4	146	-1	150	564181	2	II	●	—	—	17.2	45.0	17.9	52.0
						1	I	—	◎	—	16.6	36.8	16.0	26.5
FB-2				100	1688630	2	II	●	—	—	18.9	38.4	18.2	45.0
						2	I	—	◎	—	16.9	37.3	—	—
FB-3				70	8382698	2	I	●	—	—	17.5	16.9	17.9	27.3
						2	II	—	◎	—	19.7	43.0	—	—
FC-1	4	182	0.1	150	105086	1	I	●	—	—	17.3	23.5	18.1	34.0
FC-2				100	572011	1	I	◎	—	—	17.1	30.0	16.8	38.7
						2	I	○	—	—	17.0	23.2	16.4	32.0
						1	I	—	◎	—	17.6	31.4	—	—
FC-3				70	1903905	2	II	◎	—	—	19.4	32.9	18.0	36.7
						2	I	—	●	—	17.9	37.3	17.6	36.8
FC-4				50	7532218	2	I	●	—	—	17.0	36.3	18.6	39.3
						2	I	—	◎	—	18.2	26.0	—	—

表 20 疲労試験の結果（その 2）

試験体	t_2 (mm)	P_{re} (kN)	R	$\Delta\sigma_1$ (MPa)	繰返し回数	ボ** ルト	亀裂 タイプ	添接板		母材	r_{c1} (mm)	θ_{c1} (°)	r_{c2} (mm)	θ_{c2} (°)
								ナット 側	ボルト 頭側					
FD-1	4	182	0.5	80	578977	1	I	●	—	—	16.0	29.1	15.9	36.7
						2	I	◎	—	—	18.8	31.9	—	—
						1	I	—	◎	—	17.1	26.5	17.1	28.3
FD-2				50	2148014	2	I	—	●	—	20.3	20.3	20.1	18.3
						1	III	—	—	◎	18.0	40.4	—	—
FD-3				40	8473525	2	I	◎	—	—	17.5	20.6	18.8	30.1
						1	I	○	—	—	18.2	34.5	—	—
						1	II	—	●	—	19.0	46.4	20.3	37.7
FD-4				30	25000000*	2	—	—	○	—	—	—	—	—
FE-1	6	182	0.1	150	268339	1	III	—	—	●	18.6	68.9	18.8	56.6
FE-2				100	893511	2	III	—	—	●	17.2	60.8	20.6	57.9
						2	IV	—	◎	—	—	—	—	—
FE-3				70	4034636	2	I	●	—	—	17.4	29.3	18.0	23.7
						2	I	—	◎	—	17.1	13.6	17.6	32.1
FF-1	8	182	0.1	150	307785	1	III	—	—	◎	21.3	59.1	—	—
						2	III	—	—	●	18.5	49.0	—	—
FF-2				150	270908	2	III	—	—	●	19.2	61.9	—	—
FF-3				100	1050673	1	III	—	—	◎	21.8	52.9	—	—
						2	III	—	—	●	21.0	56.1	19.4	61.6
FF-4				70	10000000*	—	—	—	—	—	—	—	—	—

* : 表記の繰返し回数において試験体が未破断

** : 下図に示すように、1 は上のボルト、2 は下のボルト



● : 試験体を破断させた疲労亀裂

◎ : 試験体を破断させていないが、板厚方向を貫通した疲労亀裂

○ : 板厚未貫通の表面亀裂

表 20 において、 $\Delta\sigma_1$ は荷重を母材の総断面積で除して得られる母材の公称応力範囲である。試験体 FC-2 に関しては、試験体を破断させた疲労亀裂が、ボルト 1 のナット側とボルト頭側のどちらであるか判断できなかったため、●は示されていない。

試験体 FD-4 は繰返し回数 2500 万回で疲労亀裂が観察されなかったが、疲労試験終了後実施した引張試験により、図 32 に示すように、ボルト孔ではなく、座金の下で添接板が破断した。添接板には半円形の疲労破面が観察され、これを起点として添接板が破断している。引張試験後確認された疲労亀裂が、繰返し回数 2500 万回の時既に停留亀裂であったかどうかは不明である。



図 32 試験体 FD-4

5.2.1 疲労亀裂のタイプ

表 20 の亀裂タイプを図 33 に示す。疲労亀裂のタイプは I から IV の 4 種類である。

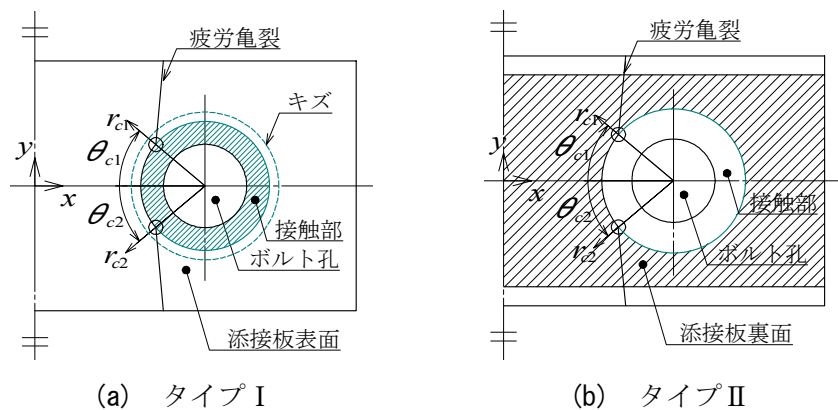


図 33 亀裂タイプ

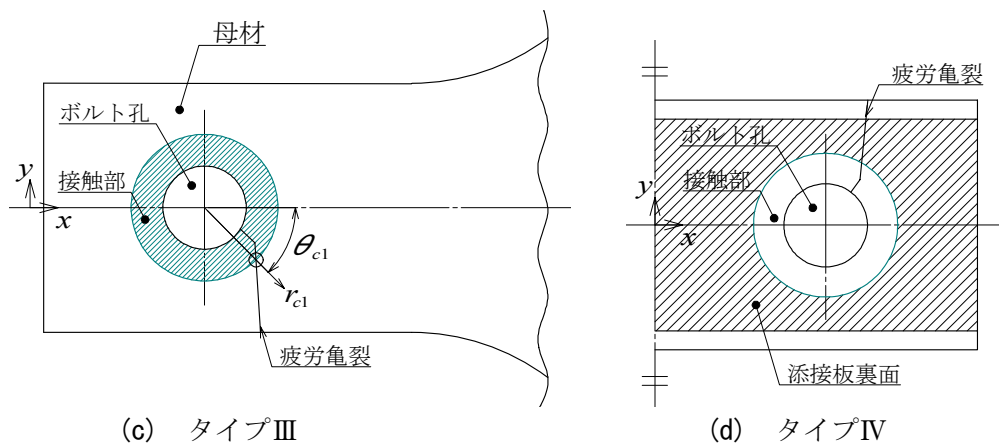
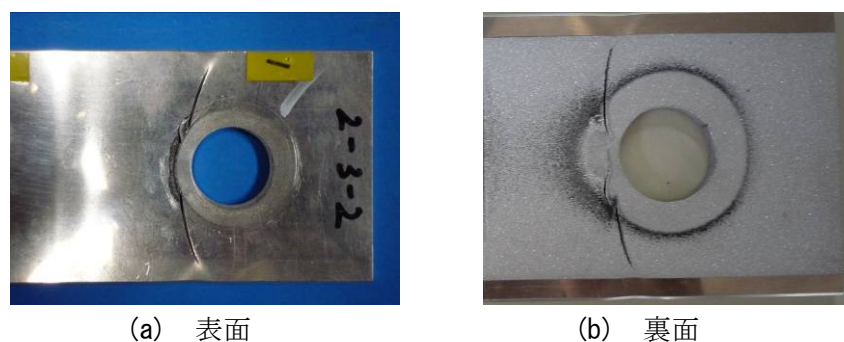


図 33 亀裂タイプ (その 2)

(a) 亀裂タイプ I

図 33 (a)に示すように、タイプ I の亀裂は、突合せ側の添接板の表面で、ボルトの座金との接触によって残された添接板の接触跡の縁上で、荷重方向から約 30° の位置に発生し、一方は荷重方向に対して直角な方向に添接板の材縁に向かって伝播し、他方は接触跡の縁に沿って伝播する。タイプ I の亀裂は、接触跡の縁上に発生しているので、フレット疲労によって起こされたものである。

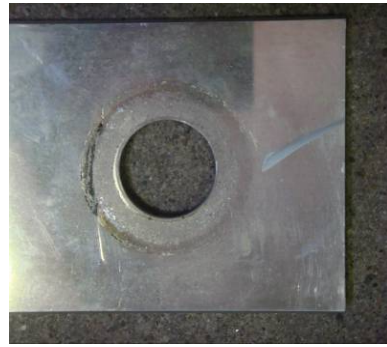
タイプ I の亀裂が発生した試験体 FA-2 と FC-2 の様子をそれぞれ図 34, 35 に示す。図 34 (a) は座金側の添接板の表面を示し、図 34 (b) はブラスト処理が施された裏面を示す。裏面には、添接板と母材がこすれることによって生成した黒い粉 (3.1.2 項(a)参照) が接触跡の縁に付着している。図 34 に示す例では、添接板の材縁に向かって伝播している疲労亀裂は表面と裏面に現れているが、表面の接触跡の縁に沿って伝播している疲労亀裂は裏面にまだ現れていない。図 35 に示す例では、添接板の表面に発生した疲労亀裂がまだ裏面に現れていない。このような亀裂は試験体 FC-2 と FD-3 で確認された。



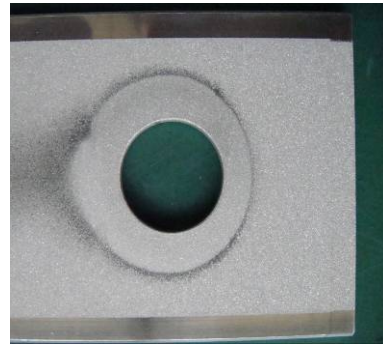
(a) 表面

(b) 裏面

図 34 試験体 FA-2 (亀裂タイプ I)



(a) 表面



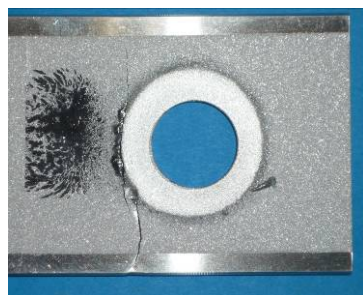
(b) 裏面

図 35 試験体 FC-2 (亀裂タイプ I)

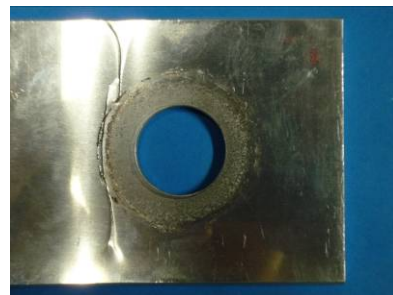
(b) 亀裂タイプ II

図 33 (b)に示すように、タイプ II の亀裂は、突合せ側の添接板の裏面で、母材との接触によって残された添接板の接触跡の縁上で、荷重方向から約 40° の位置に発生し、一方は荷重方向に対して直角な方向に添接板の材縁に向かって伝播し、他方は接触跡の縁に沿って伝播する。タイプ II の亀裂は、接触跡の縁上に発生しているので、フレット疲労によって起こされたものである。

タイプ II の亀裂が発生した試験体 FB-3 の様子を図 36 に示す。図 36 (a) はブラスト処理が施された添接板の裏面を示し、図 36 (b) は座金側の表面を示す。図 36 (a) に示すように、添接板の裏面に施されたブラスト処理によって付けられた裏面の凹凸は、黒い粉より内側のボルト孔周辺は、母材との接触によって滑らかになっている。表面の接触跡の縁に沿って伝播している疲労亀裂は、図 36 (b) に示すように、座金との接触によって残された表面の接触跡の縁の少し外側を通過している。これは、添接板のブラスト処理が施された接触跡が、座金側の接触跡より広いので¹²⁾、裏面の接触跡の縁を伝播する疲労亀裂が板厚方向を伝播して表面に現れた位置は表面の接触跡の縁より外になるからである。



(a) 裏面



(b) 表面

図 36 試験体 FB-3 (亀裂タイプ II)

(c) 亀裂タイプ III

図 33 (c)に示すように、タイプ III の亀裂は、添接板の材端側の母材の表面で、添接板との接触によって残された母材の接触跡の縁上で、荷重方向から約 60° の位置に発生し、一方は荷重方向に対して直角な方向に母材の材縁に向かって伝播し、他方は接触部の内側をボルト孔の縁に向かって伝播する。タイプ III の亀裂は、接触跡の縁上に発生しているので、フレット疲労によって起こされたものである。

タイプ III の亀裂が発生した試験体 FD-2 の様子を図 37 に示す。ボルト孔周辺の金属光沢が失われた部

分で、母材は添接板と接触し、接触跡の縁に黒い粉が付着している。

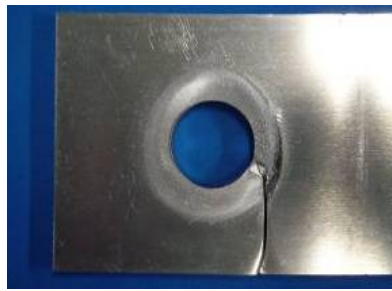
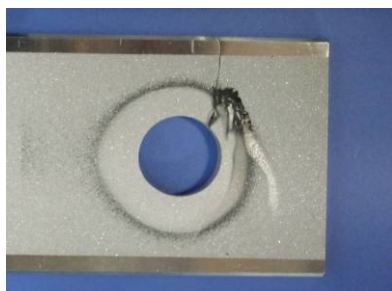


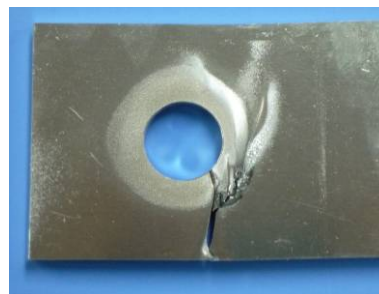
図 37 試験体 FD-2（亀裂タイプⅢ）

(d) 亀裂タイプⅣ

図 33 (d)に示すように、タイプⅣの亀裂は、添接板の材端側の添接板の裏面に発生する。タイプⅣの亀裂が発生した試験体 FE-2 の様子を図 38 に示す。図 38 (a)は、ブラストが施された添接板の裏面を示し、図 38 (b)は、この添接板と接触していた母材を示す。図 38 (b)の亀裂はタイプⅢであり、図 38 (a)の亀裂の形状はこれと同じである。したがって、母材に発生したタイプⅢの亀裂が添接板とこすれることによって、タイプⅣの亀裂が添接板に発生したと考えられる。



(a) 添接板の裏面（亀裂タイプⅣ）



(b) 母材（亀裂タイプⅢ）

図 38 試験体 FE-2

5.2.2 疲労亀裂の発生部位

試験体を破断させた疲労亀裂（表 20 で●に対応する亀裂）の発生部位の個数を表 21 に示す。母材の板厚と添接板の総厚が同じ試験体シリーズ FA から FD においては、疲労亀裂は全て添接板に発生している。そして初期導入軸力 P_{re} の違いおよび応力比 R の違いによって、ナット側およびボルト頭側で疲労亀裂の発生部位の個数に差は見られない。

試験体シリーズ FC, FE および FF の比較から分るように、添接板の板厚が厚くなるに従って、添接板に生じる応力が低下するために、疲労亀裂は母材に発生するようになる。

表 21 疲労亀裂の発生部位

試験体 シリーズ	添接板 1 枚 の板厚(mm)	初期導入軸力 P_{re} (kN)	応力比 R	添接板			母材
				ナット側	ボルト頭側	合計	
FA	4	146	0.1	2	2	4	0
FB			-1	3	0	3	0
FC		182	0.1	2	1	3	0
FD			0.5	1	2	3	0
FE	6		0.1	1	0	1	2
FF	8		0.1	0	0	0	3

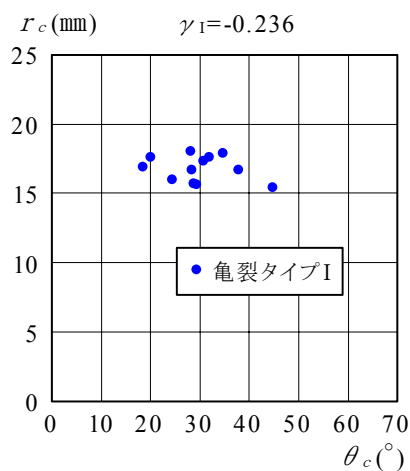
5.2.3 疲労亀裂の発生位置

図 33 の各図において、白丸で示されている疲労亀裂の発生点が、ボルト孔を中心とする極座標 (r_c, θ_c) を用いて表 20 に示されている。この表における r_c と θ_c の関係を図 39 に示す。同図には、次式で計算される r_c と θ_c の相関係数 γ の値も示されている。

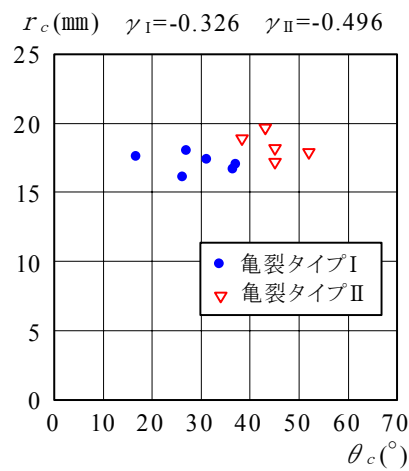
$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{r}_c - r_{ci})(\bar{\theta}_c - \theta_{ci})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\bar{r}_c - r_{ci})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (\bar{\theta}_c - \theta_{ci})^2}} \quad (15)$$

ここに、 n ：サンプルの総数、 $\bar{r}_c$ と $\bar{\theta}_c$ ：それぞれ r_c と θ_c の平均値。

図 39 の相関係数 γ の値から、各試験体シリーズにおいて、各亀裂タイプに対する r_c と θ_c の相関は弱い。

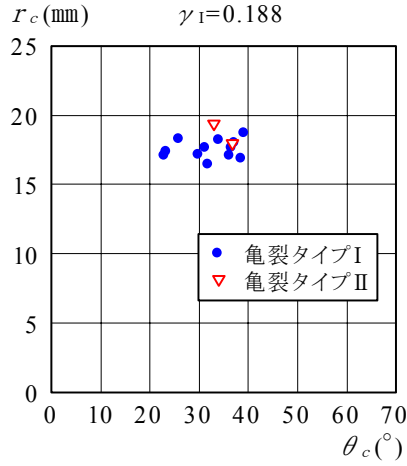


(a) 試験体シリーズ FA

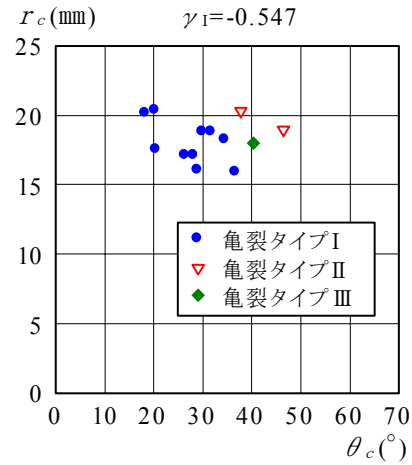


(b) 試験体シリーズ FB

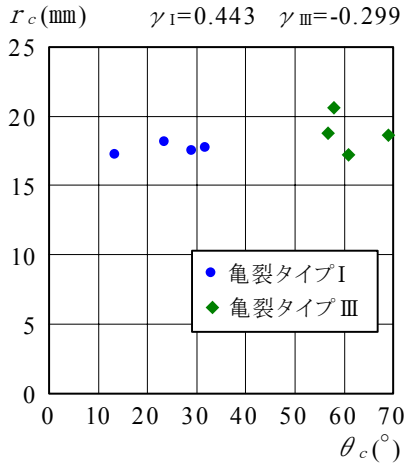
図 39 r_c と θ_c の関係



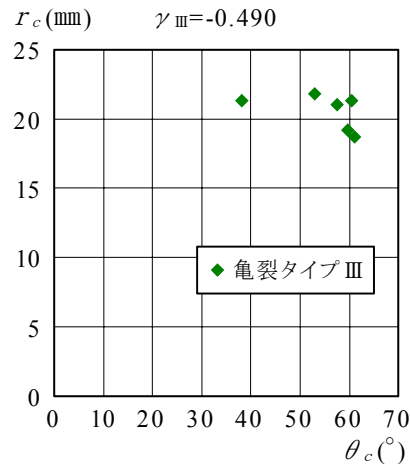
(c) 試験体シリーズ FC



(d) 試験体シリーズ FD



(e) 試験体シリーズ FE



(f) 試験体シリーズ FF

図 39 r_c と θ_c の関係 (その 2)

各亀裂タイプに対して、各試験体の $\overline{r_c}$ と $\overline{\theta_c}$ の値を表 22 に示す。同表には r_c と θ_c の最小値 $r_{c\min}$ と $\theta_{c\min}$ ならびに最大値 $r_{c\max}$ と $\theta_{c\max}$ も示されている。

タイプ I の亀裂に関して、初期導入軸力 P_{re} のみが異なる試験体シリーズ FA と FC の比較より、 $\overline{r_c}$ と $\overline{\theta_c}$ に大きな違いは見られない。応力比 R のみが異なる試験体シリーズ FA と FB の比較、および FC と FD の比較、ならびに添接板の板厚 t_2 のみが異なる FC と FE の比較より、 $\overline{r_c}$ と $\overline{\theta_c}$ に大きな違いは見られない。 $\overline{r_c}$ は約 17.5 mm であり、 $\overline{\theta_c}$ は約 30° である。

タイプ II の亀裂に関して、 $\overline{r_c}$ および $\overline{\theta_c}$ の試験体シリーズ間において大きな違いは見られない。 $\overline{r_c}$ は約 19 mm であり、 $\overline{\theta_c}$ は約 40° である。タイプ II の亀裂の $\overline{r_c}$ がタイプ I の亀裂の $\overline{r_c}$ より大きいのは、母材側の添接板の接触跡が座金側の接触跡より広いからである¹²⁾。

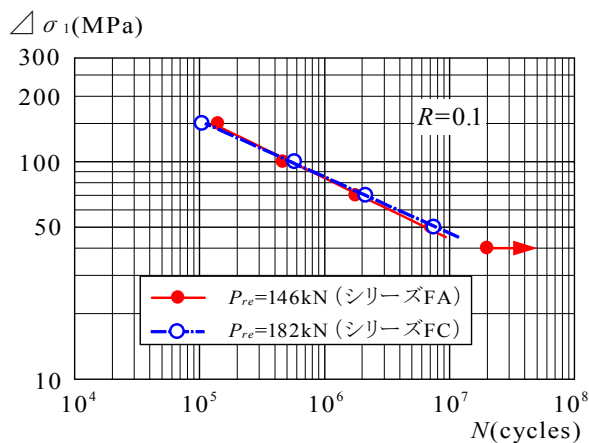
タイプ III の亀裂に関して、添接板の板厚 t_2 が異なる試験体シリーズ FD、FE および FF の比較から、添接板が厚くなるに従って、 $\overline{r_c}$ の値は大きくなる。これは、添接板が厚くなるに従って、添接板と接触する母材の接触部分が大きくなるためである。サンプル数が 1 つの試験体シリーズ FD を除くと、 $\overline{\theta_c}$ は約 60° である。

表 22 $\bar{r}_c$ と $\bar{\theta}_c$ の値

亀裂 タイプ	亀裂発生点	試験体 シリーズ	P_{re} (kN)	R	t_2 (mm)	n	$\bar{r}_c$ (mm)	$r_{c\min}$ (mm)	$r_{c\max}$ (mm)	$\bar{\theta}_c$ (°)	$\theta_{c\min}$ (°)	$\theta_{c\max}$ (°)
I	添接板 表面	FA	146	0.1	4	12	16.7	15.3	17.9	30.1	18.7	45.0
		FB	146	-1		6	17.0	16.0	17.9	29.3	16.9	37.3
		FC	182	0.1		10	17.5	16.4	18.6	32.4	23.2	39.3
		FD	182	0.5		10	18.0	15.9	20.3	27.6	18.3	36.7
		FE	182	0.1	6	4	17.5	17.1	18.0	24.7	13.6	32.1
II	添接板 裏面	FB	146	-1	4	5	18.4	17.2	19.7	44.7	38.4	52.0
		FC	182	0.1		2	18.7	18.0	19.4	34.8	32.9	36.7
		FD	182	0.5		2	19.7	19.0	20.3	42.1	37.7	46.4
III	母材	FD	182	0.5	4	1	18.0			40.4		
		FE	182	0.1	6	4	18.8	17.2	20.6	61.1	56.6	68.9
		FF	182	0.1	8	6	20.6	18.7	21.8	54.9	38.1	61.0

5.2.4 S-N 関係

初期導入軸力 P_{re} のみが異なる試験体シリーズ FA と FC の S-N 関係を図 40 に示す．縦軸には母材の公称応力範囲 $\Delta\sigma_1$ が採られている．各試験体シリーズに対する S-N 曲線の m ， $\log c$ および ξ_N の値を表 23 に示す．試験体シリーズ FA と FC の S-N 関係はほぼ同じであるので，F8T と F10T の初期導入軸力の違いによって疲労強度は変わらない．

図 40 S-N 関係（初期導入軸力 P_{re} の影響）表 23 m ， $\log c$ および ξ_N の値

試験体 シリーズ	P_{re} (kN)	m	$\log c$	ξ_N
FA	146	3.58	12.880	0.069
FC	182	3.84	13.397	0.039

応力比 R のみが異なる試験体シリーズ FA と FB，および FC と FD の S-N 関係を図 41，各試験体シリーズに対する S-N 曲線の m ， $\log c$ および ξ_N の値を表 24 に示す．応力比 R が大きくなるに従って，疲

疲労強度は低下するが、傾き m は応力比 R に関らず約 3.7 である。試験体シリーズ FA と FC では、破断した試験体の亀裂タイプは I であったが、試験体シリーズ FB と FD では、タイプ II の亀裂で破断した試験体もあった。しかし、図 41 から、両者の疲労強度に違いは見られない。

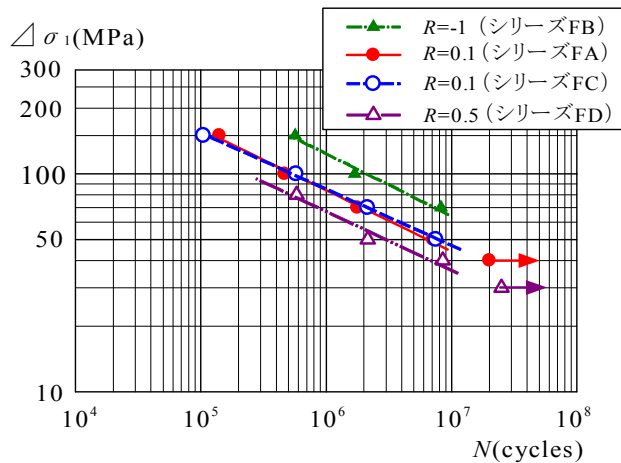


図 41 S-N 関係（応力比 R の影響）

表 24 m , $\log c$ および ξ_N の値

試験体 シリーズ	P_{re} (kN)	R	m	$\log c$	ξ_N
FA	146	0.1	3.58	12.880	0.069
FB		-1	3.52	13.369	0.120
FC	182	0.1	3.84	13.397	0.039
FD		0.5	3.70	12.767	0.177

添接板の板厚 t_2 のみが異なる試験体シリーズ FC, FE および FF の S-N 関係を図 42, 各試験体シリーズに対する S-N 曲線の m , $\log c$ および ξ_N の値を表 25 に示す。添接板の板厚 t_2 が厚くなっても、傾き m は約 3.5 である。添接板の板厚 t_2 が 4 mm から 6 mm に増えると、疲労強度が増加するが、6 mm から 8 mm に増加しても、疲労強度は増加しない。これは、添接板の板厚が厚くなると、添接板に生じる応力は低下するので、タイプ I と II の疲労亀裂の発生が抑制されるが、母材に生じる応力は添接板の板厚が厚くなっても変わらないので、タイプ III の亀裂の疲労強度は添接板の厚さに影響されないからである。

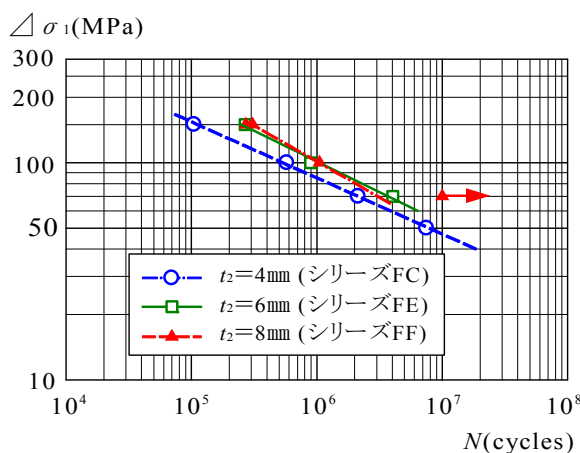


図 42 S-N 関係（添接板の板厚 t_2 の影響）

表 25 m , $\log c$ および ξ_N の値

試験体 シリーズ	t_2	m	$\log c$	ξ_N
FC	4	3.84	13.397	0.039
FE	6	3.54	13.106	0.085
FF	8	3.19	12.392	0.039

タイプ I と II の亀裂で添接板を破断させた試験体の S-N 関係を図 43, 各応力比 R に対する S-N 曲線の m , $\log c$ および ξ_N の値を表 26 に示す。図 43 の縦軸には、2 枚の添接板の総断面積で荷重を除いて得られる添接板の公称応力範囲 $\Delta\sigma_2$ が採られている。同図には第 3 章で述べた部材端継手試験体の下フ

ランジの添接板の疲労強度も示してある．応力比が 0.054 の部材端継手試験体の疲労強度は，この応力比に近い 0.1 に対する S-N 曲線の上に乗っている．

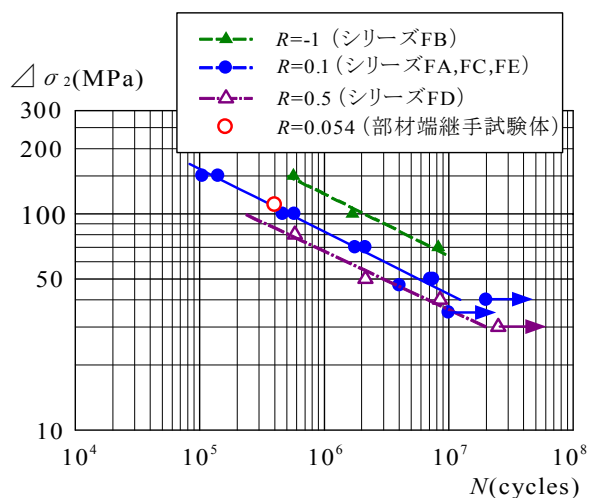


図 43 S-N 関係（亀裂タイプ I と II）

表 26 m , $\log c$ および ξ_N の値

R	m	$\log c$	ξ_N
-1	3.52	13.369	0.120
0.1	3.80	13.346	0.119
0.5	3.70	12.767	0.177

タイプⅢの亀裂で母材を破断させた試験体の S-N 関係を図 44，S-N 曲線の m , $\log c$ および ξ_N の値を表 27 に示す．図 44 の縦軸には，母材の公称応力範囲 $\Delta\sigma_1$ が採られている．同図の S-N 曲線と図 43 の $R = 0.1$ に対する S-N 曲線を比較すると，母材の疲労強度は添接板の疲労強度より高い．特に，母材の疲労限度は添接板の疲労限度よりかなり高い．

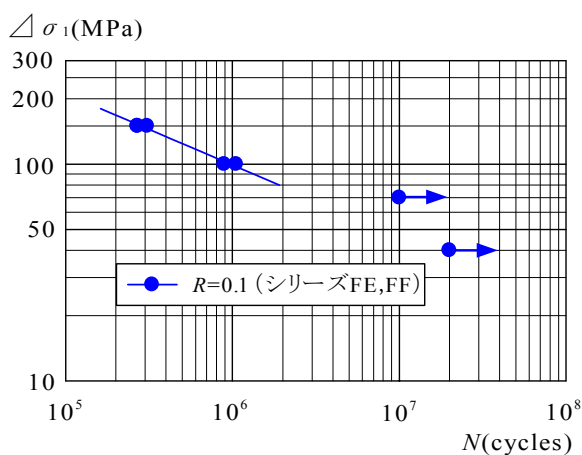


図 44 S-N 関係（亀裂タイプⅢ）

表 27 m , $\log c$ および ξ_N の値

R	m	$\log c$	ξ_N
0.1	3.05	12.078	0.040

第 6 章 結論

本研究では、アルミニウム床版を被締結材とした鋼製高力ボルトによる摩擦接合継手の疲労特性を明らかにするために、アルミニウム床版の現場継手を試作し、継手強度試験および疲労試験を実施した。次に、ブラスト処理が施された添接板の疲労試験および 1 列ボルトの摩擦接合継手の疲労試験を実施した。本研究で得られた主な結論は次の通りである。

- (1) 部材端継手試験体（図 5(b) 参照）の継手強度試験を実施した結果、試験時のすべり荷重が設計値より低かった。これは、ボルト締めのために長いハンドホールが下フランジに設けられ、部材端の突合せ近傍の下フランジに高力ボルトが設けられていないこと、ならびにボルト列数が 7 列と多いことが原因であると考えられる。したがって、下フランジにハンドホールを設ける必要がなく、2 枚添接板とすることによりボルト列数を少なくした部材端の継手構造を考案する必要がある。
- (2) 部材端継手試験体（図 10 参照）の疲労試験を実施した結果、ウェブの添接板と下フランジの添接板に疲労亀裂が発生した。疲労亀裂は、鋼製高力ボルトの座金と接触する添接板の表面の接触跡の縁、およびウェブまたは下フランジと接触する添接板の摩擦面の接触跡の縁に発生した。これらの疲労亀裂は、接触面の縁がこすられることによって、磨耗による表面損傷を伴うフレット疲労によるものである。
- (3) 側辺継手試験体（図 20 参照）の疲労試験を実施した結果、疲労亀裂は発生しなかった。
- (4) ブラスト処理が施された添接板の疲労試験を実施した結果、ブラスト処理によって添接板の表面に付けられた凹凸が疲労強度に与える影響は小さい。
- (5) 1 列の鋼製高力ボルトで締結されたアルミニウム合金板摩擦接合継手の疲労試験を実施した結果、添接板と母材に疲労亀裂が発生し、それらは 3 タイプに分類される（図 33 参照）。タイプⅠの亀裂は、突合せ側の添接板の表面で、鋼製高力ボルトの座金との接触跡の縁に発生する。タイプⅡの亀裂は、突合せ側の添接板の裏面の摩擦面で、母材との接触跡の縁に発生する。タイプⅢの亀裂は、添接板の材端側の母材の表面で、添接板との接触跡の縁に発生する。これらの亀裂は、いずれもフレット疲労によるものである。
- (6) 添接板の総板厚が母材の板厚に等しい場合、試験体はタイプⅠまたはⅡの亀裂で添接板が破断する。添接板が厚くなるに従って、添接板に生じる応力が低下するために、タイプⅢの亀裂で母材が破断する。
- (7) 高力ボルトへの F8T と F10T の初期導入軸力の違いによって疲労強度は変わらない。
- (8) 応力比が高くなるに従って、疲労強度は低下する。-1 から 0.5 の応力比に対して、S-N 曲線の傾きは 3 から 4 の間である。
- (9) 添接板（タイプⅠとⅡの亀裂）と母材（タイプⅢの亀裂）の S-N 曲線をそれぞれ図 43, 44 に与えた。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅰ共通編 Ⅱ鋼橋編，2002.
- 2) 河合徳雄・前島真二：鋼合成桁橋梁の床板取替えと主桁補強～乙津橋補強工事～，川田技法，Vol.25，pp.54-59，2006.
- 3) 大倉一郎，萩澤亘保，岩田節雄，北村幸嗣：アルミニウム橋実現のための技術開発，軽金属，軽金属学会，第54巻，第9号，pp.380-387，2004.
- 4) 大倉一郎，岡田理，萩澤亘保，大澤章吾：開閉断面アルミニウム床版の開発，構造工学論文集，Vol.51A，pp.1219-1227，2005.
- 5) 島貫繁吉，山口進吾：資源循環型床版の施工ーリサイクル材を利用したアルミニウム合金製床版，橋梁&都市 PROJECT，第37巻，第11号，pp.5-11，2001.
- 6) 山田雅義，武本頼和：アルミ床版による新加古川大橋拡幅について，大阪大学，阪大フロンティア研究機構，第1回アルミニウム合金構造物実現のためのシンポジウム，pp.26-27，2004.
- 7) 塚本健三，末廣本治，中林章，大隅心平：アルミニウム合金製橋梁ーJR 川棚駅前広場自由通路橋，橋梁&都市 PROJECT，第38巻，第6号，pp.4-8，2002.
- 8) 大倉一郎，筒井将仁：地覆定着のためのアルミニウム床版の引抜強度，ALST研究レポート，No.4，2008.
- 9) 大倉一郎，高木眞広，石川敏之：アルミニウム床版ー鋼桁橋の合成作用および温度変化による応力と反り，ALST研究レポート，No.5，2008.
- 10) 日本建設機械化協会，施工技術研究所：道路橋用アルミニウム床版の移動載荷疲労試験報告書，2008.
- 11) 萩澤亘保，大倉一郎，岩田節雄，北村幸嗣：2117アルミニウム合金製大径リベットの開発とその強度特性，軽金属，軽金属学会，第56巻，第8号，pp.441-447，2006.
- 12) 萩澤亘保，大倉一郎：鋼製高力ボルトで締結されたアルミニウム合金板摩擦接合継手のすべり係数と鋼製高力ボルトの軸力低下，ALST研究レポート，No.7，2009.
- 13) アルミニウム建築構造協議会：アルミニウム建築構造製作要領，アルミニウム建築構造物製作工場認定規程および基準・同解説，pp.39-50，2003.
- 14) アルミニウム建築構造協議会：アルミニウム建築構造設計規準・同解説，2003.
- 15) 日本アルミニウム協会（旧軽金属協会）：アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案（第一次改訂試案），1998.
- 16) 大倉一郎，石川敏之，筒井将仁，大澤章吾：トラックタイヤの接地形状がアルミニウム床版の板曲げ応力に与える影響，土木学会論文集A，Vol.63 No.4，pp.655-666，2007.
- 17) 土木学会：高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針（案），pp.64-65，2006.