

# ショットブラスト処理された高力ボルト摩擦接合部の疲労特性

辻 岡 静 雄\*

## Fatigue Properties of Friction Joints with Shot-Blasted Surfaces

Shizuo Tsujioka

This paper describes the fatigue tests of the prototype friction joint using high-strength bolts and presents S-N diagrams for practical applications. The test parameters are the magnitude of the clamping force, the grade of the connected material and the thickness of the splice plate. The load cycle for fatigue testing is the pulsating tension. It is found that the fatigue crack growth starts on the surface at a point of stress concentration such as a hole and a point of fretting.

### 1. はじめに

高力ボルト摩擦接合部<sup>1,2)</sup>では、主すべりが起こらなければ、応力は材間摩擦力で伝達され、一般的な疲労破壊は純断面部(ボルト孔欠損部)で孔縁から亀裂が発生し板幅方向に成長することで生じる。しかし、第1ボルト前面における添え板と中板との接触部分で大きな応力集中が発生し、繰返しを受ける場合には密着面からの亀裂発生およびその進展による母材破壊が生じることがある。この現象はフレットイング(fretting)疲労と呼ばれ、繰返し荷重下で金属の接触面の微小な相対すべりが生じる部分にのみ発生するものである。

この接合部の疲労特性は摩擦面処理方法、締付け力、添え板板厚などの各因子との相関で決定づけられるものである。一般に、鋼板表面の凹凸は一種の切欠き作用で凹凸が大きくなるほど疲労強度は低下することなどが得られているが<sup>3)</sup>、高力ボルト摩擦接合における赤錆、ショットなどの表面処理が疲労強度に及ぼす定量的評価については不明である。一方、有孔部分では疲労強度が低下する。即ち、切欠き効果であり、これは形状と寸法(応力集中係数と応力勾配)、材質の強度に支配される。一般に、設計では切欠き係数 $\beta$ が用いられ、切欠き材の疲労強度の予測の方法が提案されている<sup>3)</sup>。ところで、すべり耐力の向上のため高力ボルト摩擦接合部に超高力ボルト<sup>4)</sup>を用いた場合、摩擦力が増大することにより相対的に孔部の応力が緩和されるので、母材孔部の疲労破壊よりもフレットイング疲労破壊のモードが卓越するものと考えられる。また、締付け軸力が大きいことによる孔周辺母材の降伏現象に起因する疲労強度の低下も考えられる。

本研究では、標準的な高力ボルト摩擦接合部について鋼種、ボルト締付け力、添え板板厚、ボルト本数を実験変数としたせん断形継手の疲労試験の概要を報告したうえで、その疲労特性(疲労強度、破壊モード)を検討・考察する。

---

\* 建設工学科 建築学専攻

表1 試験体一覧

シリーズ	記号	鋼種	母材	添え板	ボルト		初期ボルト 張力	数量
					本数	鋼種		
A	FJN10	SN400B	PL-12	PL-9	1-M20	F10T	18.2 t	5
	FJN14	"	"	"	"	F14T	26.6 t	6
B	FJN10	SN400B	PL-12	PL-6	"	F10T	18.2 t	5
	FJN14	"	"	"	"	F14T	26.6 t	5
	FJN20	"	PL-19	PL-12	2-M20	F10T	18.2 t	5
C	FJN20	SN490B	PL-16	PL-12	2-M20	F10T	18.2 t	7

表2 鋼材の機械的性質

シリーズ	鋼材	鋼種	降伏応力度 MPa	引張強さ MPa	伸び %
A	PL-9	SN400B	278	436	34
	PL-12		319	450	31
B	PL-6	SN400B	324	458	29
	PL-12		264	438	29
	PL-19		259	430	34
C	PL-12	SN490B	358	544	25
	PL-16		359	543	26

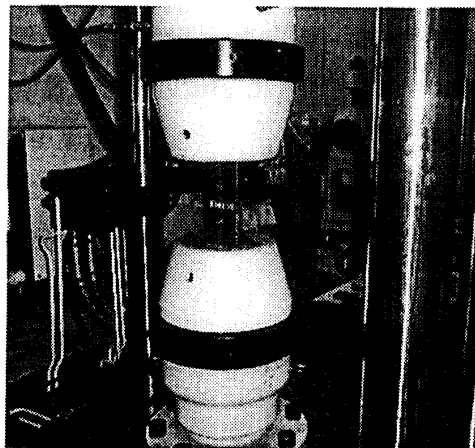
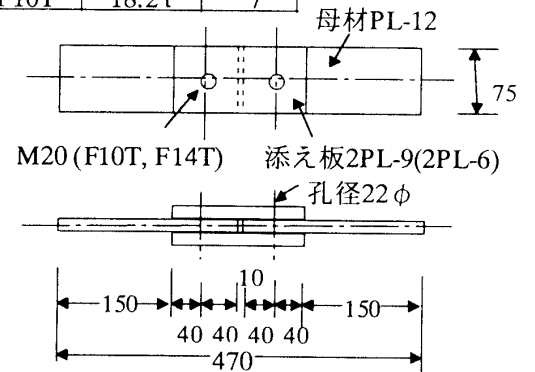
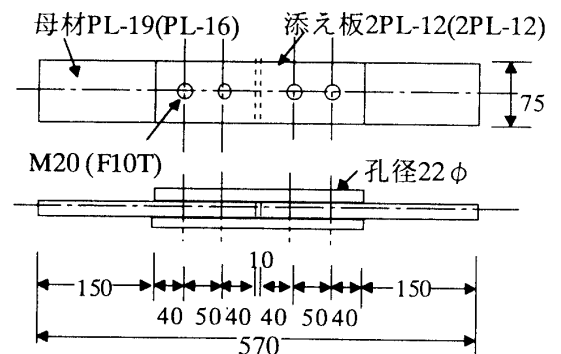


写真1 試験体設置



(a) 単一ボルト継手



※ ( ) 内はシリーズCの場合

(b) 2本ボルト継手

図1 継手試験体

## 2. 疲労試験概要

試験体は単一ボルトおよび2本ボルトせん断形継手である(図1)。実験変数は鋼種 (SN400B, SN490B)、初期ボルト張力 (18.2 t, 26.6 t)、添え板板厚 (PL-6, PL-9, PL-12)、ボルト本数で試験体総数は33体である。試験体の一覧を表1に示すが、実験は母材板厚に比べて添え板総板厚が1.5倍の単一ボルト試験体のAシリーズ、添え板総板厚/母材板厚が1.0倍の単一ボルトおよび2本ボルト試験体のBシリーズ、SN490B鋼材の2本ボルト試験体のCシリーズからなる。ここに、初期ボルト張力はM20ボルトの標準ボルト張力に相当する値である。摩擦面にはショットブラスト処理を施し、その表面粗さRzは50S程度とした。なお、使用鋼材の機械的性質を表2に示す。

片振り繰返し引張加力を対象とし、油圧サーボ式構造物疲労試験装置を用いて周波数2~5Hzの0-to-tensionの正弦波の定常波試験を行った(写真1)。ボルト張力の導入はボルト軸部に貼付した歪

表3 疲労試験結果

シリーズ	試験体記号	最小応力度 (MPa)	最大応力度 (MPa)	応力範囲 (MPa)	疲労寿命 (cycles)	破壊部位
A	FJN10-020	5.45	202	196	2000000	-
	FJN10-021	5.45	211	206	1359130	母材孔部破断
	FJN10-022	5.45	221	216	1606828	母材孔部破断
	FJN10-023	5.45	231	226	641129	母材孔部亀裂
	FJN10-024	5.45	241	235	1	主すべり
	FJN14-020	5.45	202	196	2000000	-
	FJN14-021	5.45	211	206	944229	母材フレットング破壊
	FJN14-022	5.45	221	216	1600595	母材フレットング破壊
	FJN14-024	5.45	241	235	638220	母材フレットング破壊
	FJN14-026	5.45	260	255	453662	母材フレットング破壊
B	FJN14-028	5.45	280	275	8	主すべり
	FJN10-019	5.45	192	186	1564186	母材フレットング破壊
	FJN10-021	5.45	202	196	1513149	母材フレットング破壊
	FJN10-021	5.45	211	206	976604	すべり、表面亀裂
	FJN10-022	5.45	221	216	698158	すべり、表面亀裂
	FJN10-023	5.45	231	226	5229	主すべり
	FJN14-019	5.45	192	186	2000000	-
	FJN14-021	5.45	211	206	1050114	母材フレットング破壊
	FJN14-023	5.45	231	226	693329	母材フレットング破壊
	FJN14-024	5.45	241	235	493305	母材フレットング破壊
	FJN14-025	5.45	251	245	455152	孔部破断(表面亀裂有り)
	FJN20-020	3.44	200	196	2000000	-
	FJN20-021	3.44	214	211	676747	母材孔部破断
	FJN20-023	3.44	229	226	220614	母材孔部亀裂
	FJN20-024	3.44	244	240	123161	母材孔部亀裂
	FJN20-025	3.44	254	250	2238	主すべり
C	FJN20-022	4.09	220	216	2000000	-
	FJN20-024	4.09	239	235	2000000	-
	FJN20-026	4.09	259	255	2000000	-
	FJN20-027	4.09	269	265	1169420	母材孔部破断
	FJN20-028	4.09	279	275	472217	母材孔部破断
	FJN20-030	4.09	298	294	329528	母材孔部破断
	FJN20-032	4.09	318	314	184170	母材孔部破断

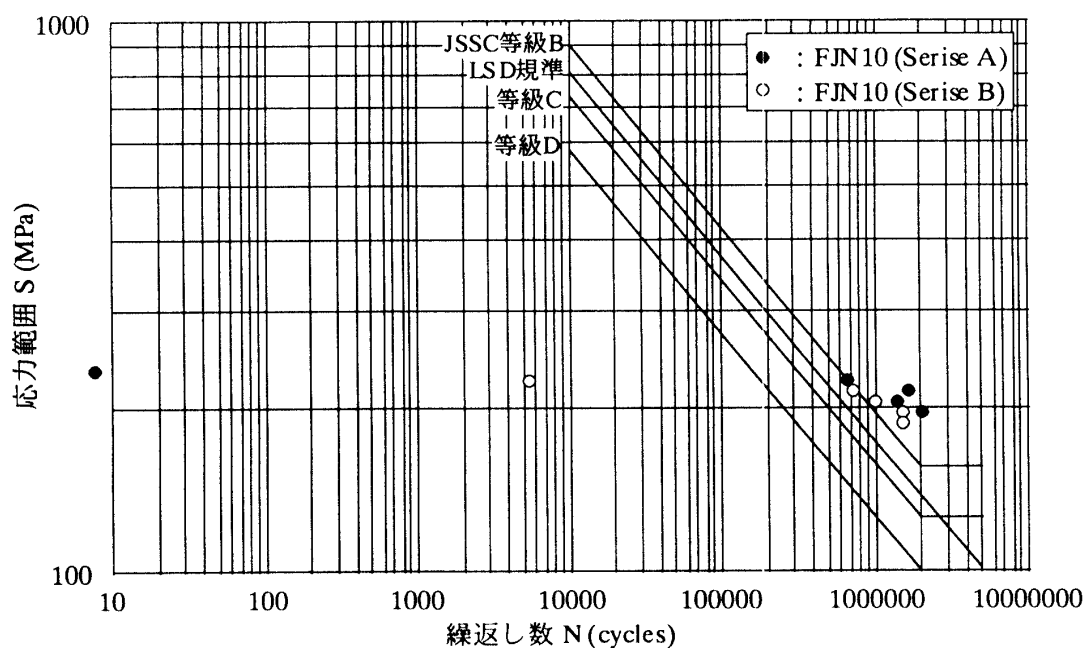


図2-a S-N線図 (F10T、M20高力ボルト)

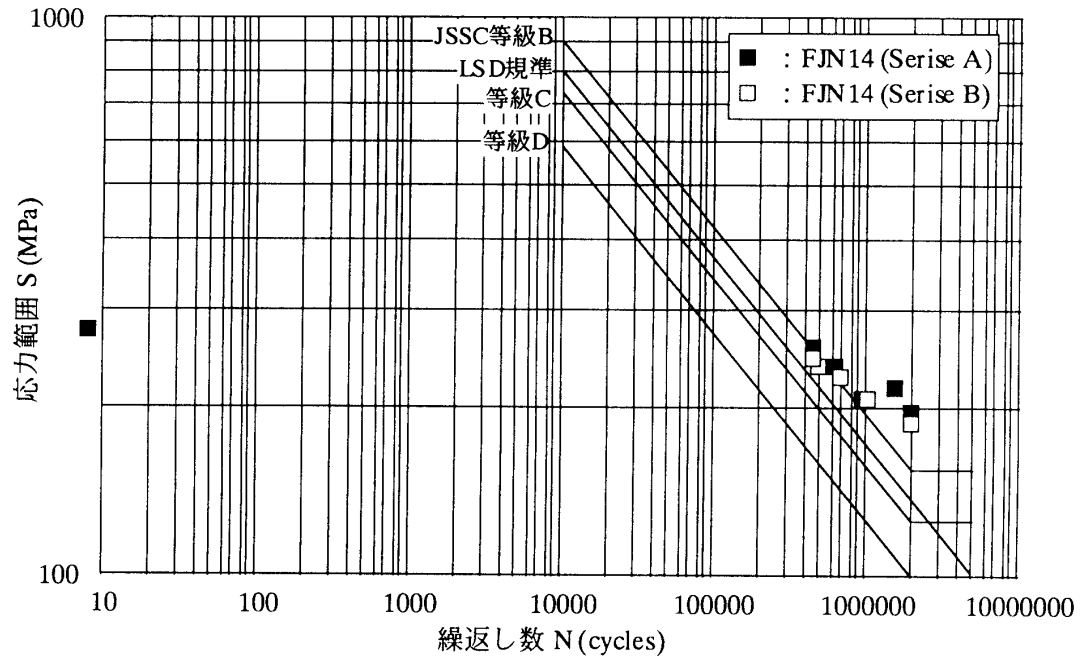


図 2-b S - N線図 (F14T 級、M20 ボルト)

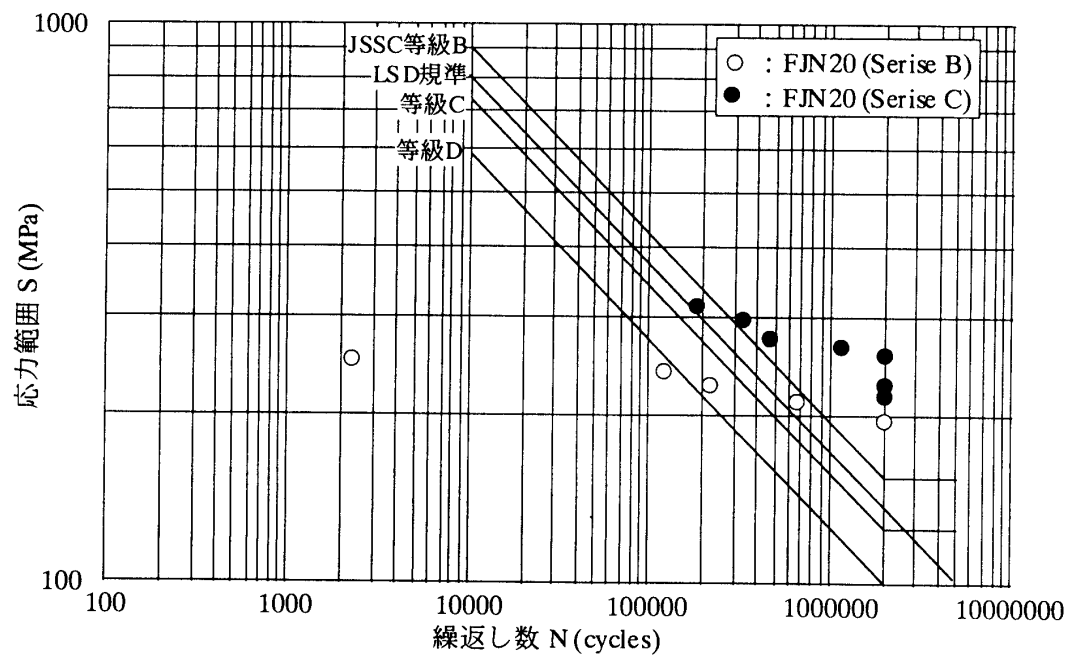


図 2-c S - N線図 (F10T、2-M20 ボルト)

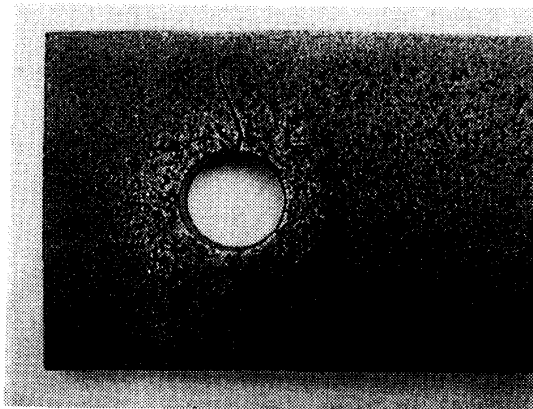


写真 2 FJN10-021 (A シリーズ)

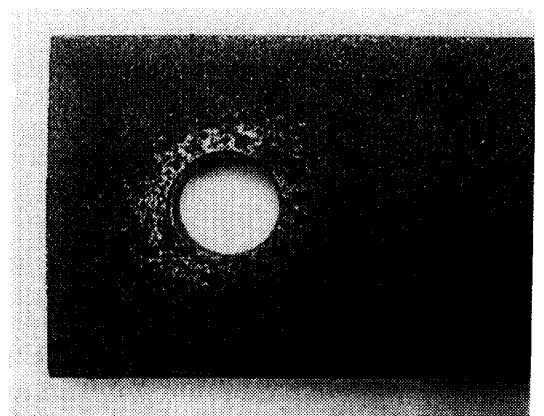


写真 3 FJN10-020 (B シリーズ)

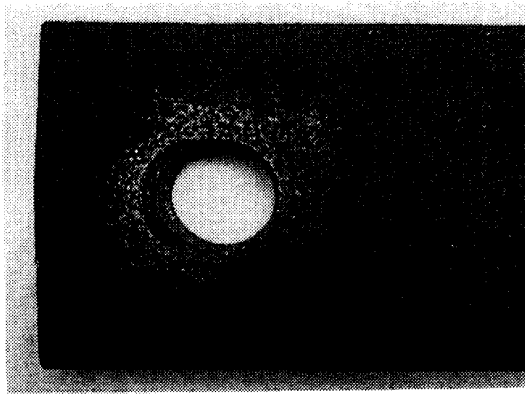


写真4 FJN14-024 (Bシリーズ)

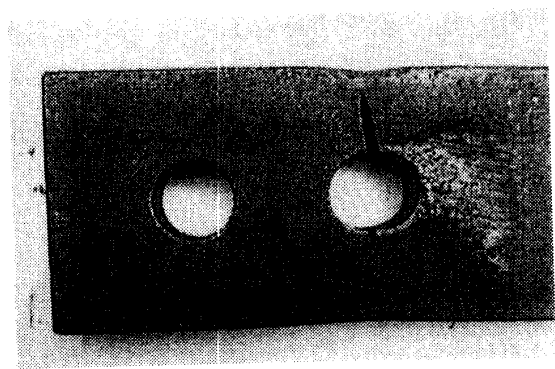


写真5 FJN20-023 (Bシリーズ)

ゲージで管理し、繰返し数5千～2万回毎に加振力、加振変位、ボルト軸歪の最大値、最小値を記録すると共に、破断時の繰返し数を記録した。

### 3. 実験結果と考察

疲労試験結果及びS-N線図を表3、図2に示す。図の縦軸は母材の総断面に対する公称応力範囲Sで、横軸は応力繰返し数Nであり、A、B、Cシリーズの破断に至るまでの繰返し数（疲労寿命）Nfを□印または○印で示す。また、図中には高力ボルト摩擦接合部の疲労設計曲線<sup>5,6)</sup>も実線で示しておく。なお、各試験体の降伏耐力Pyは母材総断面部の全塑性引張耐力で、欠損部（孔部）降伏耐力Pyeは母材純断面部の全塑性引張耐力以外に第1ボルト孔前面でボルト単体のすべり耐力の30%が伝達されるものとして算定している。すべり耐力Ps算定に当ってはすべり係数 $\mu$ を0.6、ボルト張力を標準ボルト張力とした。

#### (1) 単一ボルトせん断形継手の場合

##### (a) F10T、M20高力ボルトを用いた場合

試験体の降伏耐力Py、欠損部（孔部）降伏耐力Pyeはすべり耐力Ps以上で、実験での最大荷重はすべり耐力以下である。Aシリーズではいずれも母材の孔部中央部より亀裂が発生して板幅方向に進展し、疲労破壊が生じた。添え板の破壊やフレットングによる亀裂は認められなかった（写真2）。一方、Bシリーズでは、すべりとフレットングによる亀裂破断が母材に生じた（写真3）。

総断面応力で表された疲労強度についてJSSC<sup>6)</sup>の疲労設計指針の設計曲線の等級Bは安全側の評価を与え、従来の結果<sup>1)</sup>と大差無いと言える。

##### (b) F14T級、M20ボルトを用いた場合

締付け力が大きいためすべり耐力が降伏耐力（ほぼ欠損部降伏耐力に等しい）以上の試験体である。最大荷重が降伏耐力近傍では主すべりの発生や孔部の疲労破壊が見られたが、大多数が母材の孔前面の領域（ほぼ座金の外縁）に表面亀裂が発生し板厚・板幅方向に進展した結果として疲労破壊が生じた。これはフレットングによるものであり、破壊に至らない亀裂も多数認められた（写真4）。なお、孔部での疲労破壊でも孔前面でのヘアクラックが発生していた。この単一ボルトの試験体での締付け力の差異による破壊モードの違いは孔部前面の相対すべりが生じる領域での疲労

強度が締付け力の大きさと相対すべり量に影響されることによるものと考えられる。また、総断面応力で表された疲労強度の実験結果はJSSCの疲労設計指針の設計曲線の等級Bで評価出来、添え板総板厚/母材板厚が1.0の結果(Bシリーズ)は1.5の結果(Aシリーズ)より若干寿命は短い傾向がある。

## (2) 2本ボルトせん断形継手の場合

SN400B材を用いたシリーズBの試験体はすべり耐力>降伏耐力>欠損部降伏耐力で、実験での最大荷重は降伏耐力以下で行った。母材総断面での降伏耐力近傍では繰返しにより継手の主すべりが生じたものの、ほとんどが母材の孔部中央部より亀裂が発生して疲労破壊した(写真5)。総断面応力で表された疲労強度をJSSCの疲労設計指針の設計曲線の等級Bは危険側に評価する。特に、最大荷重が欠損部降伏耐力から降伏耐力の範囲の試験では部分降伏による低サイクル疲労亀裂発生で等級D程度まで寿命が短くなる。

一方、SN490B材を用いたシリーズCでは降伏耐力>すべり耐力>欠損部降伏耐力で、母材の孔部中央部より亀裂が発生して疲労破壊した。実験では母材の欠損部降伏耐力近傍では寿命が短くなるが、JSSCの疲労設計指針の設計曲線の等級Bで評価できると考えられる。また、総断面応力で表された疲労限はSN400B材を用いた場合に比べ上昇する。

## 4. 纏め

ボルト締付け力と添え板板厚を実験変数とした単一ボルトせん断形継手供試体および2本ボルトせん断形継手供試体の疲労試験を行い、高力ボルト摩擦接合部の疲労特性について実験的に検討・考察した。

その結論を要約すれば以下の通りである。

- a) 単一ボルトせん断形継手では添え板総板厚/母材板厚、締付け軸力の大小によって疲労破壊モードが変動するが、疲労強度に大きな違いはない。
- b) 2本ボルトせん断形継手の疲労破壊は母材のボルト孔の中央部より亀裂が発生し板幅方向に進展するモードである。
- c) JSSCの疲労設計指針の設計曲線等級Bは総断面応力の応力範囲で表した継手の弾性限度以下の実験値を安全側に評価する。

## 参考文献

- 1) 日本鋼構造協会編：鋼構造接合資料集成、技報堂、1977.3.
- 2) J.W.Fisher and J.H.A.Struik : Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints, JOHN WILEY & SONS, 1974.
- 3) 日本材料学会編：疲労設計便覧、養賢堂、1995.1.
- 4) 日本建築学会：鋼構造接合部の力学性能と設計法、1996.10.
- 5) 日本建築学会：鋼構造限界状態設計規準(案)・同解説、1990.2.
- 6) 日本鋼構造協会編：鋼構造物の疲労設計指針・同解説、技報堂、1993.4.

(平成10年11月17日受理)