

ボルトおよびリベット継手の疲れ試験データベースの 作成とその利用

FATIGUE DATA BASE FOR BOLTED AND RIVETED JOINTS

三ツ木幸子*・近藤明雅**・山田健太郎***・寺尾圭史****

By Yukiko MITSUGI, Akimasa KONDO, Kentaro YAMADA and Keiji TERA0

A fatigue test data base of bolted and riveted joints is established using a personal computer. The data base of fatigue strength of bolted and riveted joints can be used for fatigue assessment of bridges in service and establishing maintenance plan. In order to express test conditions and fatigue strength, 49 items are input and 14 others are calculated from the input data. So far, 294 fatigue test data on bolted joints and 298 data on riveted joints have been collected from various sources. The factors affecting fatigue strength of bolted and riveted joints are investigated using application programs, and the data is compared with fatigue allowable stresses of current fatigue design code.

Keywords: joints, data base, fatigue, rivet, bolt

1. ま え が き

溶接継手・母材の疲れ試験データベースは、データシートの形であるいはコンピュータを用いて作成されているが¹⁾など、ボルト・リベット継手(以下、ファスナー継手とよぶ)に関する疲れ試験データベースは、現在のところ、わが国では報告されていない。

ファスナー継手についても、疲れ試験結果の古いデータを蓄積しデータベースを作成して手軽にかつ有効に再利用できることは有意義であり、最近問題となっている既設構造物の耐久性の評価と今後の維持補修計画を立てるうえでもその必要性は大きい。同様な主旨で、最近、経年橋から切り出したリベット継手部材を用いた実験が行われ、データの再評価が行われている^{2)~5)}。

本研究では、ファスナー継手の疲れ試験条件および試験結果の情報の収集・整理にパーソナルコンピュータを使用し、市販のデータベース言語と BASIC を利用して、

データベースおよびそのアプリケーションプログラムを作成した。高力ボルト継手 294、リベット継手 298 の疲れ試験データを入力し、その応用例を示した。

2. ファスナー継手の疲れ試験データベースの構成

(1) ファスナー継手の疲労寿命を決定する要因^{6)~14)}

ファスナー継手は、母材、添接板、ファスナーの3つの要素からなり、いろいろな状態で組み合わせられる。

ファスナー継手の疲労寿命を決定する要因は、ファスナーの種類を除いて、大きく、①形状に関するもの、②応力に関するもの、③材料に関するもの、④仕上げ方法に関するもの、さらに、特殊な使用を考えた場合の⑤試験環境に分けられる。

ファスナー継手の疲労寿命を決定する要因として、まず、ファスナーの種類が考えられるが、これは形状および材料の双方に関係するものである。

形状に関する具体的な要因は、母材と添接板については板幅と板厚、ファスナーについては直径と長さ、さらに、これらを組み合わせる場合のファスナーの本数、配置の仕方、クリアランスの大きさなどである。このほかに、添接板の枚数、フィラーの有無、総断面と純断面の断面積比などが考えられる。

* 正会員 工修 (株)地域経営研究所
(〒102 千代田区五番町 12)

** 正会員 工博 名城大学講師 理工学部土木工学科
(〒468 名古屋市天白区塩釜口)

*** 正会員 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)

**** 正会員 工修 (株)横河橋梁製作所研究所
(〒260 千葉県千葉市新港 88)

応力に関するものとしては、応力範囲、上限応力、下限応力、応力比（下限応力/上限応力）、支圧応力、せん断応力、すべり応力、すべり係数、支圧応力と純断面応力の比などが考えられる。応力の大きさは意味が異なるが、繰返し速さと伝達機構に関係する荷重の種類も応力に関する要因として考える。

材料については、材質、降伏応力度、引張強度、伸びなどであり、仕上げ方法については、接触面の状態、孔の明け方、板の切断仕上げ方法などが考えられる。

試験環境は、20°C 前後の空气中が一般的であるが、

塩水中や高温、低温などの環境も考えられる。

(2) データベースの項目の選定

データベースの項目の選定は、主としてせん断型の継手を対象とし、①前述の疲労強度を直接支配する要因を構成する試験条件、②研究機関および試験機の種類などの試験データを検討する場合にその影響が考えられる間接的要因、③試験結果を引用した参考文献の情報、④結果の情報など、を表現するべく行った。さらに、せん断型以外の継手も収録できるようにいくつかの項目を設けた。

本データベースの入力項目として、表一のように49項目を選定した。また、検索項目は、この入力項目から計算によって求めた14項目（表一2）を加え、63項目とした。

表一では、データの取り扱い上、ある試験グループにおいて各データに共通な項目と各データ固有のものに分けた。各データ固有の項目は、試験条件のうち応力範囲など応力に関するものと試験結果で構成され、これらを補う形で、特記事項を設けてある。試験条件の応力に関するもの以外は、各データに共通な項目とした。試験体の形状、環境、応力の大きさには直接関係のない繰返し速さなどの荷重条件がこれに属する。

これらの試験条件は、①の疲労強度を直接支配する要因を構成する試験条件である。このうち、(1)で述べた形状に関する情報を詳しく収録し、ファスナーの配置の仕方については、1列目の本数、列数、荷重方向と荷重直角方向の縁端距離、荷重方向と荷重直角方向のファスナーの孔の間隔などで表現した。千鳥配置などでこれ表現しきれないものについては、特記事項の項に示した。形状に関してのデータを詳しく収録し、応力に関するデータについては純断面応力表示の応力範囲と下限応力およびボルト軸力だけを入力し、その他は計算によって求める形をとった。

表一 データベースの入力項目

項目の分類		具体的項目	
各データに共通な要因	参考文献；	文献番号、言語、研究機関名、発行年、特記事項、特異性、コメントの有無	
	試験結果を評価する場合に、注意を要する事項	試験機の種類、容量、試験実施年、備心検査	
	試験体	母材；	材質、板厚、板幅、降伏応力度、引張強度、伸び
		添接板；	材質、板厚、降伏応力度、引張強度、伸び
		ファスナー；	材質*、直径、長さ
		母材、添接板、ファスナーの配置関係など	ボルト本数、1列目の本数、列数、荷重方向の縁端距離、直角方向の縁端距離、荷重方向の孔間隔、直角方向の孔間隔、軸力、接触面の状態、クリアランス、対称性
試験条件	試験環境	環境、温度	
	荷重条件	繰返し速さ、荷重の種類	
各データ固有の値	試験条件と試験結果に対するその他の情報	特記事項、コメントの有無	
	静的試験結果	すべりの有無、すべり荷重	
	疲労試験結果	破断までの繰返し数、破断状態、破断図	

*ファスナーの種類も、表示・検索可能な形で入力する。

表一2 検索項目における追加項目

応力範囲（純断面 $\sigma_{r,g}$ ）
上限応力（純断面 $\sigma_{max,n}$ ・純断面 $\sigma_{max,g}$ ）
下限応力（純断面 $\sigma_{min,g}$ ）
応力比R
すべり応力（純断面 $\sigma_{slip,n}$ ・純断面 $\sigma_{slip,g}$ ）
公称支圧応力 σ_B
せん断応力 τ_R
$\sigma_B/\sigma_{r,n}$ $\sigma_B/\sigma_{r,g}$
$\tau_R/\sigma_{r,n}$ $\tau_R/\sigma_{r,g}$

$\sigma_{r,n}$ ：純断面に対する応力範囲
 なお、 σ_B 、 τ_R 、 $\sigma_{r,g}$ については表中の説明を参照

参考文献の情報については、表-1に示す主要な情報だけを収録し、その他は参考文献番号で参考文献に戻れる方法をとった。

試験結果の間接的影響を及ぼす要因については、参考文献の情報で表現されているもののほか、試験機の種類、容量、試験実施年、偏心検査を取り上げた。

検索項目では、すべり荷重をすべり応力で表現した。また、応力範囲、上限応力、下限応力およびすべり応力については、表示方法として純断面応力と総断面応力の2種類の方法が考えられるため、双方とも取り上げた。支圧応力およびせん断応力については、応力範囲との比率も、項目として取り上げた。

通常、添接板の断面積は主板より大きく設計するので、疲労強度特性を検討する場合、添接板に関するデータは検討項目としてあまり使用することはない。このほか、試験機の種類、容量、試験環境、温度なども現在のところあまり使用することがない。しかしながら、今後さまざまな条件下で試験が行われることも考え、現段階ではこれらの項目を残すことにした。

孔の明け方については、ほとんどが、記述されていないか、ドリルによる孔明（ボール盤）であったので、項目を設けずに特記事項で対処することにした。

(3) 試験結果の表示方法

試験結果については、すべりの有無の項で、すべりが生じたか生じなかったか、あるいは、それについての記述があるか否かなどを明確にした。

また、破断について、どこで破断したかを破断図の項で表現できるようにした。破断状態の項である程度表現できるが、この項を設けることにより、さらに詳しい情報を収録できる。

3. データベースとそのアプリケーションプログラム

(1) 概要

データベースおよびそのアプリケーションプログラムはパーソナルコンピュータ(PC-9801)を用いて、市販のデータベース言語とBASICを利用して作成した。

データベースとそのアプリケーションプログラムの関係を図-1に示す。本システムは、疲れ試験データのデータベース本体とこれにアクセスするいくつかのプログラムで構成される。機能として、データ入力機能、検索機能、データ一覧機能、検索結果からのS-N線図の作図および設計S-N線図との比較機能、ヒストグラムの作図機能、マスターファイルの分離機能などが備えられている。図中、破線で示した矢印は、データの流れを表わす。

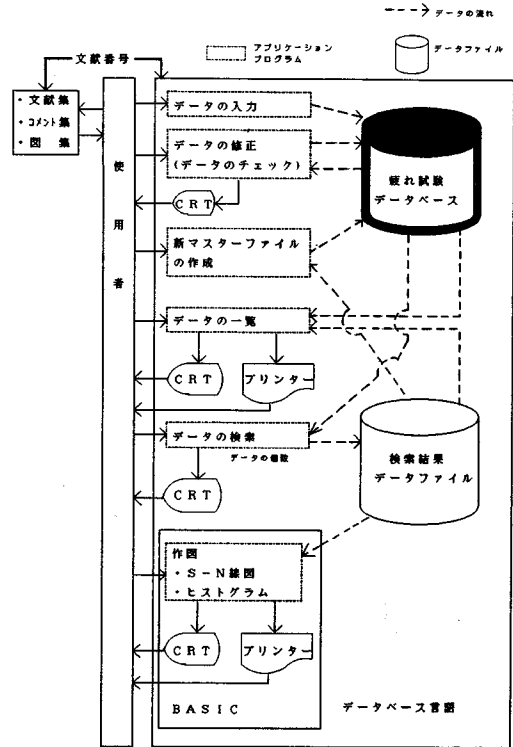


図-1 データベースとそのアプリケーションプログラム

(2) 各アプリケーションプログラムの機能の説明

a) データの追加と修正

データの追加およびすでに入力したデータの修正にあたっては、印刷機能を用いて、表形式で入力済みデータを出力し、チェック、修正することができる。

b) データの検索

すでに示した検索項目について、所望の検索条件を与えて、該当するデータを検索する。各条件はandとorどちらでも結合できる。検索結果については、データ数がCRT上に示されるが、その他の情報は作図やデータの一覧を用いて内容を見る。

c) 検索結果の作図

検索結果について、S-N線図とヒストグラムを作図することができる。図はCRT上に示し、そのハードコピーをとる。

c-1) S-N線図

純断面応力、総断面応力、等価応力¹⁾で作図できる。また、設計S-N線図との比較が可能である。

c-2) ヒストグラム

検索結果に基づいて、所望の項目について、ヒストグラムを作図する。数値データについてのヒストグラムは、検索結果の最大値と最小値が表示されて、ヒストグラムを描く区間の最小値、各区間の幅および何区間分を描く

かを入力することによってヒストグラムが描かれる。

文字データの項目についてヒストグラムを描く場合は、データごとに(24種類以内)ヒストグラムを描く。

d) データ印刷機能

マスターファイルおよび検索結果のデータについて、表形式および1レコードごとに個別表示で一覧することが可能である。この場合、印刷による一覧とCRT上の一覧が可能である。

(3) データベースに収録できなかった項目

データベースに収録できなかった項目は、文献番号によって、文献名がわかるようにした。

また、本データベースに取り入れたいデータで、このデータベースの構造では収録しにくい情報については、コメント集を作成し、手軽にこの情報を手に入れることができるようにした。このとき、コメント集への情報の収録の有無を確認できるように、特記事項にコメントの有無を知らせる記号を入れる。

4. 疲れ試験データベースの使用例^(1),16)~24)

疲れ試験データベースには、現在、10の文献から、高力ボルト継手 294 データ、リベット継手 298 データが収録されている。

(1) 高力ボルト継手

収録した 294 の疲れ試験データは、すべてせん断型高力ボルト継手のデータである。収録したデータの性質について、図-2~図-4に示す。図-2は、応力比のヒストグラムであり、294 データのうち、253 データの応力比が0.0から0.1の間にある。応力比が-1に近い両振試験は25データで、全データの約1/12である。母材に関しては、図-3に示すように多種の材質を用いて試験が行われている。材質のうちよく知られていないものについては、図中の表に降伏応力度 σ_y 、引張強度 σ_B および伸び δ を示した。これを降伏応力度でみると図-4に示すようになり、800 MPa 以上が50データ、450~600 MPa が32データあるほかは、400 MPa 以下のデータとなっている。

せん断型の高力ボルト継手は摩擦接合と支圧接合で用いられる。この違いは設計方法から決定され、両者の疲労強度を検討する場合、すべり荷重によって検討することが妥当と考えられる。一般に、設計では、母材の純断面応力が静的な強度から決められた許容応力度以下になるように断面が決定されるので、便宜的に、純断面積で除したすべり応力をパラメーターとした。

一例として、母材が40キログラム鋼材の高力ボルト摩擦接合の疲れ許容応力度の検討を行った。用いたデータは、応力比が0.0から0.1の0に近いデータであり、特殊データは除いた。道路橋示方書に従って設計された摩擦

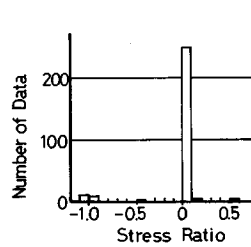


図-2 高力ボルト継手データの応力比についてのヒストグラム

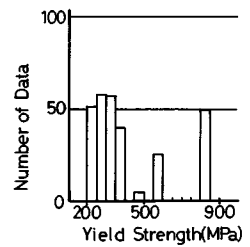


図-4 高力ボルト継手データの降伏応力度についてのヒストグラム

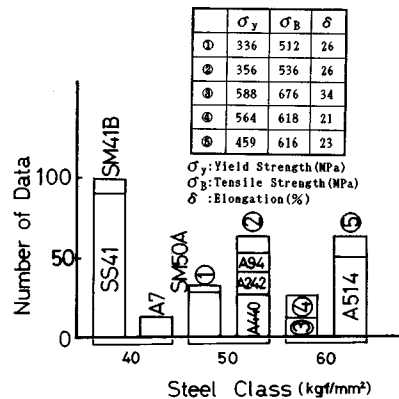


図-3 高力ボルトデータの母材材質についてのヒストグラム

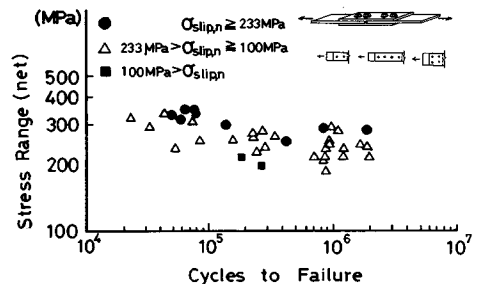
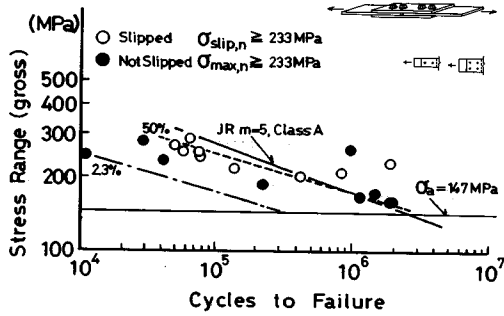
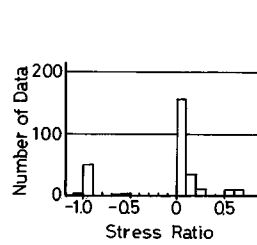


図-5 高力ボルト継手のすべり応力と疲労強度の関係

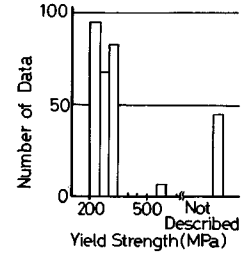
接合継手は、少なくとも設計荷重の1.7倍までの荷重ではすべらない。設計(作用)応力が許容応力度に達しているとすると、40キログラム鋼では、母材の純断面応力が233 MPa(国鉄建造物設計標準では、147 MPa \times 1.6=235 MPa)まですべらないことになる。すべり応力のわかる試験結果について、純断面すべり応力 $\sigma_{slip,n}$ が、① 100 MPa > $\sigma_{slip,n}$, ② 233 MPa > $\sigma_{slip,n} \geq 100$ MPa, ③ $\sigma_{slip,n} \geq 233$ MPa の3つのデータ群を検索し、S-N線図に描いたものが図-5である。一般に、一定の荷重まではすべり荷重が大きくなるほど疲労強度が上がるといわれるように、①(■で表示)、②(△で表示)、③(●で表示)のデータ群の順に疲労強度は大きくなっている。



図—6 高力ボルト継手の試験結果と設計 S-N 線図との比較



図—7 リベット継手データの応力比についてのヒストグラム



図—9 リベット継手データの降伏応力度についてのヒストグラム

疲れ許容応力度を検討する場合、③のすべり応力が設計を満足する 233 MPa より大きいデータは 9 データと少ない。そのため、設計を満足するデータとして、すべりを起こさなかった上限応力が 233 MPa より大きい 9 データを加えて摩擦接合に対する JR の設計 S-N 線図 ($m=5$, class A) と比較したものが図—6 である。縦軸の応力範囲は総断面に対するものである。図中、実線が設計 S-N 線図を、破線は 50% 破壊確率線を、一点鎖線は 2.3% 破壊確率線を表す。設計 S-N 線図より強度が低いデータがみられるが、図中に実線で示したように静的強度から決まる許容応力度は 147 MPa と小さい。したがって、総断面応力はさらに小さくなり、交番応力でない限り、実用上は問題がないと考えられる。

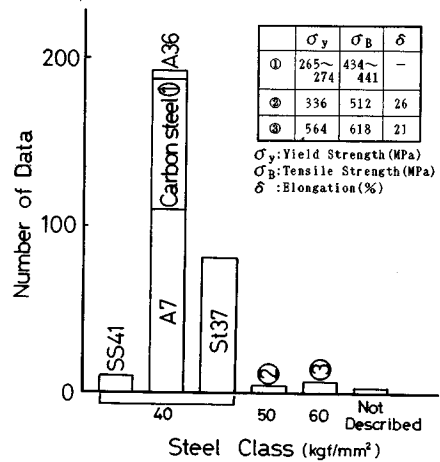
すべり応力をパラメーターとして疲れ許容応力度を検討してきたが、本データベースに収録されたデータには、すべてもすべり荷重が報告されていなかったり、すべったか否か明記されていないデータもあった。このデータの中には、かなり寿命が長いものがあった。

(2) リベット継手

リベット継手の疲れ試験データ 298 のうち、せん断型のデータは 286 データである。このうち 281 データが軸方向力だけが作用する疲れ試験結果であり、5 データが軸方向力のほかに曲げモーメントが作用した場合の結果である。応力比については、図—7 に示すように、0 から 0.1 の間に分布するデータは 159 である。継手の母材材質は、図—8 に示すようにほとんどが 40 キロ級鋼材で構成されている。降伏応力度は図—9 に示すように、不明の 45 データと 550~600 MPa の 7 データを除くと、すべて 200~350 MPa の間に分布する。

わが国の疲れ試験データが 22 データしかなく、収録データの 10% にも満たないこと、海外における疲れ試験がわが国より広範囲な試験条件のもとで行われていることなどを考えると、疲労強度を再検討する場合、海外のデータを積極的に活用する必要がある。

公称支圧応力度 σ_B と母材の純断面応力 σ_n の比率に着



図—8 リベット継手データの母材材質についてのヒストグラム

目するとわが国では σ_B/σ_n が 1.28 から 1.34 の狭い範囲で疲れ試験が行われているのに対し、海外では、広範囲にわたり試験が行われている。文献 5) では、データを ① $\sigma_B/\sigma_n \leq 1.5$, ② $1.5 < \sigma_B/\sigma_n < 2.5$, ③ $2.5 \leq \sigma_B/\sigma_n$ の 3 つに分けて、それぞれ、①支圧許容応力度が十分に使われていない、②適切に使われている、③支圧応力が大きすぎるとしている。わが国のリベット継手の疲れ試験における σ_B/σ_n の範囲は、①の支圧許容応力度が十分に使われていない領域に入る。

そこで、応力比が 0.0 から 0.1 の 40 キロ級鋼材のデータについて、 $\sigma_B/\sigma_n \leq 1.5$, $2.5 \leq \sigma_B/\sigma_n$ の条件で検索したそれぞれのデータ群について、記号 \circ と \triangle で S-N 線図に描いたものが図—10 である。この図から、 σ_B/σ_n が大きいと、疲労強度が下がることがわかる。

これまでに、列数と強度の関係が注目されてきたが、支圧比の影響もここで示したように大きいので、列数と強度の関係を検討する場合には、支圧比の確認をしておく必要があるものと考えられる。

国鉄建造物設計標準および道路橋示方書では、支圧と引張の許容応力度の比は表—3 のようになっているが、

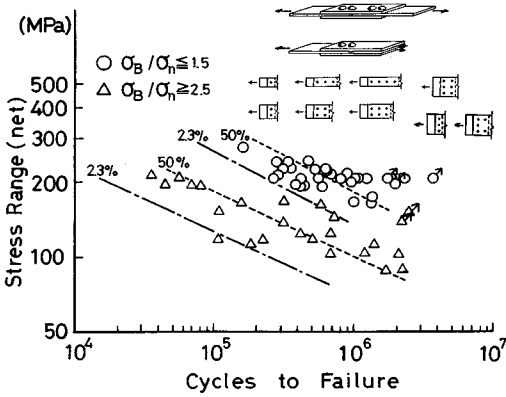


図-10 リベット継手の σ_B/σ_n と疲労強度の関係

表-3 許容応力度の比

	工場	現場
国鉄建造物設計標準(旧)	1.71	1.36
道路橋示方書	1.71	1.50

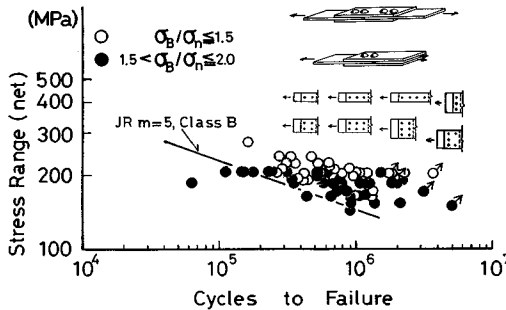


図-11 リベット継手の試験結果と設計 S-N 線図との比較

実際の設計ではこれ以上の比になる可能性がある。したがって、疲れ許容応力度の検討を行う場合、 σ_B/σ_n が幾分大きいデータを用いて検討を行うのが安全である。ここでは、①の $\sigma_B/\sigma_n \leq 1.5$ のデータ (○で表示) に、 $1.5 < \sigma_B/\sigma_n \leq 2.0$ のデータ (●で表示) を加えて、リベットに対する旧設計標準にほぼ等しい JR の設計 S-N 線図 ($m=5$, Bクラス) と比較したものが図-11 である。 $1.5 < \sigma_B/\sigma_n \leq 2.0$ のデータについては、疲れ許容応力度より強度が低いものがあるが、ほぼ満足している。

5. ま と め

本研究では、ファスナー継手の疲労試験結果のデータベースおよびその検索、アプリケーションを市販のデータベース言語と BASIC を利用して作成した。また、こ

のデータベースを用いていくつかの検索を行いその有用性を確認した。

今後さらにデータを追加し、疲労強度を決定するパラメーターの再解析を行い、各種疲労設計指針との比較をして、合理的な継手分類とそれに合った設計 S-N 線図の提案を行っていく予定である。

また、せん断型の継手(高力ボルト、リベット)以外のデータの収集を行い、これらについての疲労強度の検討を行っていくことも必要と思われる。

謝 辞：本研究にあたり、名古屋大学工学部土木工学科の宇都宮紳三、加藤正浩(現・三重県)の両君にデータの入力等に助力を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 坂巻和男・山田健太郎：疲れ試験データベースの作成とその利用，土木学会論文集，第 356 号 / I-3, pp.547~553, 1985 年 4 月。
- 竹名興英ほか：経年劣化リベットプレートガーダーの疲労強度，構造工学論文集，Vol.34 A, pp.525~534, 1988 年 3 月。
- 竹名興英ほか：経年劣化リベットプレートガーダーの疲労強度，鉄道技術研究報告，No.1339 (施設編 588 号)，1987 年 2 月。
- Office for Research and Experiments of the International Union of Railways : Statistical Analysis of Fatigue Tests on Steel Riveted Connections, DT 176 (D154), Sep., 1986.
- Brühwiler, E. und Hirt, M.A. : Das Ermüdungsverhalten genietet Brückenbauteile, Stahlbau, Vol.56, No.1, pp.1~8, 1987.
- 土木学会：国鉄建造物設計標準解説，1983 年 5 月。
- 日本鋼構造協会設計指針・同解説(案) : JSSC, Vol.10, No.101, pp.22~34, 1974 年 5 月。
- The American Association of State Highway and Transportation Officials : Standard Specification for Highway Bridges, 1983.
- British Standards Institution : Steel, Concrete and Composite Bridges, BS 5400, Part 10, 1980.
- Recommendations for the Fatigue Design of Steel Structures : Committee TC6 "Fatigue", European Convention for Constructional Steelwork, Oct., 1985.
- DS 804 Vorschrift für Eisenbahnbrücken und Sonstige Ingenieurbauwerke, Jan., 1983.
- 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，昭和 55 年 2 月。
- 日本鋼構造協会接合小委員会：鋼構造接合資料集一リベット接合・高力ボルト接合一，1977 年 3 月。
- 田島二郎：高力ボルト摩擦接合概説，技報堂，1966 年。
- 三ツ木幸子・山田健太郎：せん断型高力ボルト継手の疲労強度の等価応力による評価，昭和 61 年度中部支部研究発表会講演概要集 I-3, pp.6~7, 1987 年 3 月。

- 16) 西村 昭ほか：高力ボルト継手の疲労強度におよぼす諸要因の影響，土木学会第 27 回年次学術講演会概要集 I -228, pp.673~676, 1972 年 10 月.
- 17) 桜井季男ほか：摩擦接合の疲労強度について（続報），土木学会第 30 回年次学術講演会概要集 I -273, pp.559~560, 1975 年.
- 18) 西村 昭ほか：過大穴を有する摩擦接合の力学的性状について，土木学会第 26 回年次学術講演会概要集 I -221, pp.655~658, 1971 年.
- 19) 西村俊夫・三木千寿：高力ボルト摩擦接合のボルト軸力が疲労強度に及ぼす影響，土木学会第 27 回年次学術講演会概要集 I -107, pp.293~296, 1972 年 10 月.
- 20) 小松原政次・田島二郎・大宮克己：高張力ボルト継手の疲労試験，鉄道技術研究報告，No.232（施設編 86 号），1961 年 7 月.
- 21) 田島二郎：60 kg/mm²高張力鋼のリベットおよびボルト継手の静的ならびに疲労強度，鉄道技術研究報告，No.283（施設編 113 号），1962 年 4 月.
- 22) Birkemoe, P. C. et al. : Fatigue of A514 Steel in Bolted Connections, Proc. of ASCE, Vol.95, No. ST10, pp.2011~2030, Oct. , 1969.
- 23) Hansen, N. G. : Fatigue Tests of Joints of High Strength Steels, Proc. of ASCE, Vol.85, No. ST3, pp.51~69, March, 1959.
- 24) Birkemoe, P. C. et al. : Fatigue of Bolted High Strength Structural Steel, Proc. of ASCE, Vol.97, No. ST3, pp.935~950, March, 1971.

(1988.7.5・受付)