ワッシャーを用いたリベット締結法の提案とその効果*

木之下 広幸^{*1}, 海 津 浩 一^{*2}, 外 山 眞 也^{*3}
佐 藤 征 亜^{*4}, 徳 永 仁 夫^{*5}, 池 田 清 彦^{*1}

Proposal and Effect of Riveting Process Using the Washer

Hiroyuki KINOSHITA^{*6}, Koichi KAIZU, Masaya TOYAMA,
Masatsugu SATO, Hitoo TOKUNAGA and Kiyohiko IKEDA^{*6} Mechanical Systems Engineering, University of Miyazaki,
1-1 Gakuenkibanadai-nishi, Miyazaki-shi, Miyazaki, 889-2192 Japan

In riveting, it is very important to make the plate's deformation small as well as to obtain the high joint strength. Therefore, we proposed the new riveting process using the washer in the same way as the bolt joint in order to accomplish both purposes. In this paper, first, by changing the combinations of hardness and flow stresses of the rivet material and the plate, we investigated the deformation and strength of the joints in detail and clarified the characteristics of the joints. Next, by considering these experimental results, the new method using the washer in riveting was proposed and the effectiveness of the proposed method was examined. The obtained results show that the joint strength is improved while the deformation of the joint decreases. The usefulness of the proposed method was confirmed from those results.

Key Words: Machine Element, Fixing Element, Riveting, Joint Strength, Washer, Plate's Distortion, Hardness

1. 緒 言

リベット締結では、板のひずみや反りなどの変形を小さく抑えつつ高い締結強度を得ることが重要である。しかしながら、両者は相反するものであり、これらを両立できるリベットの締結条件を見い出すことは非常に重要な課題である。リベット締結において板のひずみや反りが生じる原因は、リベット頭部と板との間に生じる圧力とリベット軸の太りによって生じる穴内の圧力によって、板の穴周囲が塑性変形することによる。また一方で、締結強度は、それらのリベットと板との間の圧力によって変わり、板の穴周囲の塑性変形状態と密接な関係があることが著者らの研究^{(1), (2)}から明らかにされている。一般に、リベット材と板材には同種類の材料が使用されるが、板の穴周囲の塑性変形状態は、板材とリベット材の硬度と強度によって変化する。そのため、適切なリベットの締結条件を見い出す

ためには、リベット材と板材の硬度と強度の違いによって、継手の変形と強度がどのように変わるかを理解しておく必要がある。

そこで本研究では、先ず、リベット材と板材の硬度および変形抵抗の違いに着目し、リベット材と板材の組合せを数種変えてリベット締結を行い、継手の変形と締結強度の特徴ならびに問題点を明らかにした。次に、それらの問題点を改善するために、ねじ締結と同様にワッシャーを用いてリベット締結する方法を提案し、その効果について実験および有限要素解析を行い検討した。そして、提案した手法により継手の変形を小さく抑えられるとともに高い締結強度が得られることを示した。

2. リベット材と板材の組合せを変えた
場合の継手の変形と強度

2.1 リベット締結の方法 表 1 は、実験で用いたリベット材と板材の組合せを示している。また図 1 は、リベット材と板材の変形抵抗曲線（真応力-真ひずみ曲線）を示している。なお、変形抵抗曲線は、万能試験機を用いて、リベット材については単軸圧縮試験を行い、板材については引張試験を行って求めた。

* 原稿受付 2008 年 4 月 14 日。

^{*1} 正員, 宮崎大学工学部 (☎ 889-2192 宮崎市学園木花台西 1-1)。^{*2} 正員, 兵庫県立大学大学院工学研究科 (☎ 671-2280 姫路市書写 2167)。^{*3} 正員, 宮崎県工業技術センター (☎ 880-0303 宮崎市佐土原町東上那珂 16500-2)。^{*4} 宮崎県工業技術センター。^{*5} 正員, 宇部工業高等専門学校 (☎ 755-8555 宇部市常盤台 2-14-1)。

E-mail: t0d165u@cc.miyazaki-u.ac.jp

表1の①は、リベット材と板材の硬度および変形抵抗が同じ程度の場合の継手の変形とその締結強度について検討するために、初期硬さ 28Hv のアルミニウム合金 A1070BD 材から作製したリベットと初期硬さ 26Hv のアルミニウム合金 A1100P-O 材の板を組合せている。また、表1の②は、板材の硬度がリベット材の硬度よりも高く、変形抵抗も相対的に大きい場合について検討するために、初期硬さ 28Hv の A1070BD 材から作製したリベットと初期硬さ 40Hv の A1100P-H14 材の板を組合せている。同様に、表1の③は、表1の①を基準にして、リベット材の硬度が板材よりも高く、変形抵抗も相対的に大きい場合の継手の変形と強度について検討するために、初期硬さ 70Hv のアルミニウム合金 A5052BD 材から作製したリベットと初期硬さ 26Hv の A1100P-O 材の板を組合せている。なお、表1の①と③に示す硬さ 26Hv の A1100P-O 材の板は、表1の②に示す硬さ 40Hv の A1100P-H14 材の板を 350℃で3時間の焼鈍を行うことで、硬さを低下させたものである。

図2は、本研究で用いたリベット締結の方法の概要を示している。リベット直径 d_0 と板厚 t の関係には、式(1)に示す構造用継手のリベット直径と板厚の関係式⁽³⁾を用いることとし、軸直径 8mm のリベットと厚さ 2mm の板を用いて単せん断重ね継手を作製した。

$$d_0 = \sqrt{50t} - 2 \quad (\text{mm}) \quad (1)$$

なお、リベットは、予め直径 8mm、長さ 27mm の棒材を用いて据込み加工により作製した。パンチには、フラットタイプを用いた。予め作製したリベットは、軸直径を d_0 (8mm) とすると、頭部の直径を約 $1.7d_0$ に成形している。板の寸法は、厚さ 2mm、幅 36mm、長さ 100mm で、きりもみ後にリーマ通しを行って $\phi 8.5$ の穴をあけ、2枚の板を重ね合わせて継手を作製した。

図3は、継手の強度試験の方法を示している。継手の強度試験は、オートグラフ（島津製 AG-500A）を用いて、10mm/min の一定速度で、締結した板の両端を引張ることにより行った。

2.2 実験結果

2.2.1 リベット締め荷重と軸の太りについて

リベット締結した継手の変形とその締結強度は、リベット締め荷重とリベット軸の太りの状況によって大きく変わることが知られている⁽¹⁾。そこでまず、表1の①と③の組合せの場合のリベット締め荷重とリベット軸の太りの状況について検討した。

図4(A)は、リベット締め荷重と (D/d_0) の関係を表している。ここで、 (D/d_0) は、リベット頭部の直径 D とリベット軸初期の直径 d_0 の比を表している。この図か

Table1 Combinations of rivet and plate

	Rivet material (Bar, Diameter: $\phi 8$)	Plate material (Thickness: 2mm, Width: 36mm, Rivet hole: $\phi 8.5$)
①	A1070BD Initial hardness: 28 Hv 0.2% proof stress: 67 MPa	A1100P-O Initial hardness: 26 Hv 0.2% proof stress: 62 MPa
②	A1070BD Initial hardness: 28 Hv 0.2% proof stress: 67 MPa	A1100P-H14 Initial hardness: 40 Hv 0.2% proof stress: 103 MPa
③	A5052BD Initial hardness: 70 Hv 0.2% proof stress: 170 MPa	A1100P-O Initial hardness: 26 Hv 0.2% proof stress: 62 MPa

Fig.1 True stress-true strain curves for rivet materials and plate materials

Fig.2 Schematic illustrations of riveting and dimension of joint

Fig.3 Tension test of joint

ら、リベット締め荷重は、 (D/d_0) の増加とともにかなり増加すること、A5052BD 材のリベットを用いた場合は、A1070BD 材のリベットを用いた場合よりも 2 倍以上のリベット締め荷重が必要であることがわかる。

Fig 4 (A) Relationship between riveting force and (D/d_0), (B) Relationship between diameter of rivet axis and (D/d_0), (C) Relationship between change of plate's width and (D/d_0)

図 4(B)は、締結後のリベット軸の直径 d と (D/d_0) の関係を表している。なお、リベット軸の直径 d は、リベット締結した板を切断して測定している。この図から、通常リベット頭部の直径は、 $1.6 \sim 1.7 d_0$ に成形されるが、頭部の直径を $1.6 d_0$ 以上に成形した場合、いずれもリベット軸は、板の穴の直径よりも大幅に太っている。特に、A5052BD 材のリベットを用いた場合は、非常に大きな軸の太りが生じている。

図 4(C)は、締結後の継手の板幅の増加量と (D/d_0) の関係を表している。板の幅は、図 2(B) に示すリベット締結部の板幅を測定している。また、A5052BD 材のリベットを用いた継手の板幅の増加量は、板の反りが非常に大きく、測定が困難であったので図には示していない。この図から、過大なリベット軸の太りは、板幅の寸法変化をもたらすことがわかる。

2.2.2 継手の強度について

(1) A1070BD 材のリベットと A1100P-O 材の板を組合せた場合 図 5(A) は、継手の破壊の様相を示している。また、図 5(B) は、この場合の継手の最大引張荷重と (D/d_0) の関係を表している。図中の Bearing については後で述べる。図 5(A) に示すように、継手はいずれも引張荷重の増大とともに、板の接合面が徐々に開きつつ板の穴が拡大して破壊している。板の穴が破壊した原因は、 $\phi 8$ のリベット軸が $\phi 8.5$ の穴内に圧縮されて充満した場合、リベット軸は平均で 0.12 程度の塑性ひずみを受け、その変形抵抗は、加工硬化により 95MPa 程度となり、0.2% 耐力が 62 MPa の板よりも大きくなるためと考えられる。図 5(B) から、継手の最大引張荷重は (D/d_0) の増加とともに増加する特徴がある。また、継手の最大引張荷重は図 4(B) の締結後のリベット軸の直径 d と (D/d_0) の関係から、リベット軸の太りとも大きく関わることがわかる。

Fig 5 (A) Fracture of joint, (B) Maximum tensile force of joint in case of using A1070BD rivet and A1100P-O plates

次に、継手の強度について考察する。一般に、リベット継手の破壊は、リベットがせん断されて破壊する場合と板の穴周囲がリベット軸によって圧縮破壊される場合に分けられる^{(4), (5)}。板の穴周囲がリベット軸によって圧縮破壊される場合の継手の強度は、式(2)で表される支圧強さ⁽⁴⁾と呼ばれる F_p で評価される。

$$F_p = \sigma d t \quad (2)$$

ここで σ はリベット軸と穴の接触面における圧力を表し、 d はリベット軸の直径、 t は板厚を表す。図 5(B) の○印で表す Bearing の線は、リベット軸と穴の接触面における圧力 σ に板材の 0.2% 耐力 (62MPa) を用いて支圧強さ F_p を計算した結果を示している。リベット軸の直径 d は、図 4 に示した締結後の軸直径を用いている。実験により得られた継手の最大引張荷重は、式(2)で計算した支圧強さよりもかなり高く、1.8 倍～2.8 倍となっている。この継手の最大引張荷重と式(2)で計算した支圧強さの差は、後に 3・4 項にて示す複せん断継手の引張試験の結果 (図 14) から、板と板の接合面が 2 倍に増えると、継手の最大引張荷重も 2 倍程

度増加することから、主に板と板との間の摩擦力によって生じたものと考えられる。

(2) A1070BD 材のリベットと A1100P-H14 材の板を組合せた場合 図 6 は、継手の破壊の様相、ならびにこの場合の継手の最大引張荷重を示している。先ず、この場合は板材の硬度がリベット材の硬度よりも高く、変形抵抗も相対的に大きいので、締結後のリベット軸の直径は、板の穴の直径とほぼ同じであった。また、板の反りおよび板幅の寸法変化もほとんど生じていない。次に、図 6(A) に示すように、継手はいずれもリベット軸がせん断されることにより破壊する。この時、継手の最大引張荷重は、図 6(B) に示すように、 (D/d_0) の大きさに依らずほぼ一定である。このようにリベット軸がせん断破壊する場合は、継手の強度評価には一般に式(3)が用いられる。

$$F_s = \left(\frac{\pi}{4} d^2 \right) \tau_f \quad (3)$$

ここで、 F_s , τ_f , d はそれぞれ、リベット軸のせん断強さ、リベット軸のせん断破壊応力、リベット軸の直径を表している。図 6(B) 中の一点鎖線で表す線は、式(3)で計算したリベットのせん断強さ F_s を表している。なお、リベット軸のせん断破壊応力 τ_f は、ミーゼスの降伏条件を用いて、締結後のリベット軸の変形抵抗値を 95MPa とし、この値を $\sqrt{3}$ で除して求めた。先ず、式(3)で計算したリベット軸のせん断強さが、継手の最大引張荷重に近い値となることから、継手の強度がリベット軸のせん断強さによってほぼ決まることが確認できる。また、リベット軸のせん断強さが一定であることから、継手の最大引張荷重が (D/d_0) の大きさに依らずほぼ一定であると考えられる。さらに、この組合せでは、継手の最大引張荷重と式(3)で計算したリベット軸のせん断強さの差が小さいことから、引張荷重は主にリベット軸に作用し、板と板との間の摩擦力が引張荷重に及ぼす影響は小さいと考えられる。

(3) A5052BD 材のリベットと A1100P-O 材の板を組合せた場合 先ず、この組合せの場合は、A1070BD 材のリベットを用いた場合と同様に、いずれも板の穴周囲が拡大して破壊しているが、紙面の都合から省略した。図 7(A) は、A1070BD 材のリベットを用いた場合と A5052BD 材のリベットを用いた場合の継手の反りの状況を示している。この図に示すように、A5052BD 材のリベットは、A1070BD 材のリベットよりもリベット締め荷重が大きいので、板の反りが非常に大きくなるのがわかる。この結果から、板材よりも硬度が高く、変形抵抗も相対的に大きいリベット材を用いると、リベット材と板材の硬度および変形抵抗が同じ程度の場合よりも継手の変形は大きくなると考えられる。

Fig.6 (A) Fracture of joint, (B) Maximum tensile force of joint in case of using A1070BD rivet and A1100P-H14 plates

Fig.7 (A) Aspects of joints, (B) Maximum tensile force of joint in case of using A5052BD rivet and A1100P-O plates

合よりも継手の変形は大きくなると考えられる。

図 7(B) は、A5052BD 材のリベットを用いた場合の継手の最大引張荷重を表している。継手の最大引張荷重は、 $(D/d_0)=1.65$ 程度以上において A1070BD 材のリベットを用いた場合よりも高い。しかし、図 4 に示したように、過大なリベット軸の太りが生じ、継手の変形が非常に大きくなる不具合が生じている。

以上の実験結果から、①リベット材と板材の硬度および変形抵抗が同じ程度の場合、およびリベット材の硬度が板材よりも高く、変形抵抗も相対的に大きい場合において、リベット締め荷重の増加とともに過大な軸の太りが生じやすく、継手の変形が大きくなりやすいこと、②継手の変形を小さくするためには、リベット締め荷重を小さくする必要があるが、この場合の継手の強度は、リベット締め荷重の増加とともに増加するので、高い締結強度は得られないことがわかった。

3. ワッシャーを用いたリベット締結

3-1 ワッシャーを用いる目的 以上のことから、リベット材と板材の硬度および変形抵抗が同じ程度の場合よりも継手の変形は大きくなると考えられる。

場合、およびリベット材の硬度が板材よりも高く、変形抵抗も相対的に大きい場合において、ワッシャーを用いることにより、①過大なリベット軸の太りを抑え、板の寸法変化を小さくすること、②板の穴周囲の過大な塑性変形を抑えることにより、板の反りを小さくすること、③板の穴周囲の破壊を抑制し締結強度の向上を図ることを目指した。

3.2 ワッシャーを用いたリベット締結の方法

図8は、ワッシャーを用いたリベット締結の方法の概要を示している。ワッシャーには、呼び径8mmの黄銅製のみがき丸（面取り形）を用いた。ワッシャーの硬さは106Hvで、寸法は、厚さ1.6mm、外径17mm、穴径8.4mmである。リベット締結は、ワッシャーにリベット軸を挿入することにより行い、ワッシャーをリベット頭部の一方のみに用いる場合と、リベット頭部の両方に用いる場合の2通り行った。なお、ワッシャーをリベット頭部の一方のみに用いる場合は、重ね合わせた板の上側に用いた。また、ワッシャーをリベット頭部の両方に用いる場合は、リベット頭部の体積が非常に小さくなるので、頭部の体積を同じにするために軸長を2mm増したリベットを用いた。

3.3 継手の変形と締結強度の検討

(1) A1070BD 材のリベットと A1100P-O 材の板の組合せでワッシャーを用いた場合 図9は、ワッシャーを用いた場合と用いない場合の継手の反りの状況とリベット軸の断面写真を示している。この図から、リベット頭部の一方のみにワッシャーを用いた場合では、板の反りが小さくなり、リベット頭部の両方にワッシャーを用いた場合では、板の反りはほとんど生じていない。また、リベット軸の断面写真から、リベット頭部の両方にワッシャーを用いた場合では、リベット軸の直径は、板（ワッシャー）の穴の直径とほぼ同じで、その太さが均一である。また、リベット頭部の一方のみにワッシャーを用いた場合は、軸の中央部が多少樽型に変形しているが、その太りはワッシャーを用いない場合よりも小さい。以上のことから、ワッシャーを用いてリベット締結することにより、過大なリベット軸の太りを抑え、板の寸法変化と反りを小さくすることができることがわかった。

図10は、この場合の継手の破壊の様相、ならびに継手の最大引張荷重を示している。まず、図10(A)に示すようにリベット頭部の一方のみにワッシャーを用いて板を締結した場合では、全ての場合でワッシャーのないもう一方の板の穴周囲が破壊し、リベット頭部の両方にワッシャーを用いた場合では、リベット軸がせん断破壊している。次に、ワッシャーを用いた場合の

Fig.8 Riveting process using the washer

Fig.9 Aspects of joints using the washer

Fig.10 Fracture and maximum tensile force of joint in case of using A1070BD rivet, A1100P-O plates and washers

継手の最大引張荷重は、図10(B)に示すようにワッシャーを用いない場合よりも明らかに増加し、特にリベット頭部の両方にワッシャーを用いた場合では、最大引張荷重は (D/d_0) の大きさに依らずほぼ一定で、かつ非常に大きい。以上のことから、ワッシャーを用いてリベット締結することにより、継手の強度も増加することがわかった。

(2) A1070BD 材のリベットと A1100P-H14 材の板の組合せでワッシャーを用いた場合 図11は、A1070BD 材のリベットと A1100P-H14 材の板を用いた場合の継手の破壊の様相、ならびに継手の最大引張荷重を示している。まず、図11(A)にはリベット頭部の両方にワ

ッシャーを用いた場合の継手の破壊のみを示しているが、リベット頭部の一方のみ、あるいは両方にワッシャーを用いた場合のいずれも、継手はリベット軸がせん断することにより破壊している。次に、図 11 (B) から、リベット頭部の一方のみ、あるいは両方にワッシャーを用いた場合の継手の最大引張荷重は、ワッシャーを用いない場合とほとんど変わらない。この理由は、いずれも締結後のリベット軸の直径が、板の穴の直径とほぼ同じであり、リベット軸のせん断強さがほぼ同じであるためと考えられる。

(3) A5052BD 材のリベットと A1100P-0 材の板の組合せでワッシャーを用いた場合 図 12 は、A5052BD 材のリベットと A1100P-0 材の板を用いた場合の継手の破壊の様相、ならびに継手の最大引張荷重を示している。この場合の継手は、図 12 (A) に示すように、全て板の穴周りが破壊している。継手の最大引張荷重は、図 12 (B) に示すように、ワッシャーを用いない場合よりも増加し、図 10 のリベットに A1070BD 材を用いた場合よりも相対的に大きい。この理由は、A1070BD 材のリベットを用いた場合では、両方の頭部にワッシャーを用いるとリベット軸がせん断破壊するが、A5052BD 材のリベットを用いた場合では、A1070BD 材のリベットよりも強度が高いためせん断破壊せず、継手はより大きな引張荷重に耐えたと考えられる。以上のことから、この場合のリベット材と板材の組合せにおいても、ワッシャーを用いることにより継手の強度が増加することがわかった。

3.4 ワッシャーの効果の理論的考察 A1070BD 材のリベットと A1100P-0 材の板を組合せた場合、および A5052BD 材のリベットと A1100P-0 材の板を組合せた場合において、ワッシャーを用いると継手の最大引張荷重が大幅に増加する理由について考察する。

単せん断重ね継手の両端に引張力 F が作用した場合、板厚を t とすると、図 13 の模式図に示すように、板には $M = Ft$ の曲げモーメントが作用し、板表面近くの穴周囲には式 (4) で表される圧縮応力が作用することが知られている⁽⁶⁾。

$$\sigma = \frac{F}{dt} + \frac{Ft}{\frac{1}{6}dt^2} \quad (4)$$

式 (4) において、右辺第一項は、引張力 F によりリベット軸と板の穴の接触面に直接作用する圧縮応力を表し、右辺第二項は、曲げモーメント Ft により生じる最大圧縮応力を表している。継手の引張力の増大とともに板の端部の接合面が徐々に開くのは、この曲げモーメントの作用によるものと考えられる。この曲げモーメント

Fig.11 Fracture and maximum tensile force of joint in case of using A1070BD rivet, A1100P-H14 plates and washers

Fig.12 Fracture and maximum tensile force of joint in case of using A5052BD rivet, A1100P-O plates and washers

Fig.13 Typical diagram representing the distribution of bearing pressure generating by bending moment

トにより板の穴周囲に作用する圧縮応力は、板と板の接合面上ではゼロで、リベット頭部に近づくほど大きくなる特徴がある。また、曲げモーメントによる圧縮応力は、継手の引張力の増加とともに増加する。これらのことから、ワッシャーを用いない場合の単せん断重ね継手では、式 (4) に示す圧縮応力によりリベット頭部近くの穴周囲から塑性変形が生じ、穴が拡大するものと考えられる。一方、ワッシャーを用いた場合においても、曲げモーメントによる高い圧縮応力がワッシャーおよび板の穴周囲に作用するが、ワッシャーの強度がリベット軸の強度よりも高いため、ワッシャーの穴周囲は穴が拡大するようには塑性変形しない。そのため、穴周囲のき裂発生が防止されるものと考えられ

る。その結果、継手の最大引張荷重は、板の穴周囲が破壊する場合（ワッシャーを用いない場合）の引張荷重を越えて、リベット軸がせん断破壊するまで増加するものと考えられる。以上のことから、ワッシャーを用いる効果は、単せん断重ね継手の板の穴周囲に生じる大きな圧縮応力による板の破壊を防止することにあると考えられる。従って、曲げモーメントが作用しない継手では、ワッシャーを用いる効果は少ないと考えられる。そこでこれらのことを検討するため、曲げモーメントが作用しない複せん断リベット継手を作製し、ワッシャーを用いた場合と用いない場合の継手の最大引張荷重について検討した。

図 14 は、ワッシャーを用いない場合とリベット頭部の両方にワッシャーを用いた場合の複せん断継手の破壊の様相、ならびに継手の最大引張荷重を示している。まず、図 14(A) に示す複せん断継手は、いずれも中段の板の穴周囲が破壊している。次に、図 14(B) から、ワッシャーを用いない場合とリベット頭部の両方にワッシャーを用いた場合の継手の最大引張荷重は、ほとんど変わらない。以上のことから、曲げモーメントが作用しない複せん断継手では、ワッシャーを用いても締結強度は増加しないことがわかった。この結果は理論的考察の妥当性を裏付けているものと考えられる。

さらに、単せん断重ね継手の引張試験において、板の穴周囲の変形に及ぼすワッシャーの影響について、より詳細に検討するため有限要素解析も行った。継手の引張試験の解析は、有限要素コード Marc を使用して、A1070BD 材のリベットと A1100P-O 材の板を組合せた場合のワッシャーを用いた場合と用いない場合について行った。図 15 は計算モデルを示し、表 2 は計算条件を示している。計算モデルは、実験で作製した継手の形状とほぼ同じ形状とし、図に示す寸法・形状のリベットが板を締結しているものとした。なお、計算時間短縮のため、板幅の中心線で分割した 1/2 モデルを用い、さらに図 3 に示す継手の引張試験における板のチャック部をモデル化せず板の全長を短くしている。解析方法には、変形体と変形体の接触を考慮した三次元微小変形弾塑性解析を用いた。本解析は、リベット頭部の締付け力を作用させた状態での引張解析ができないため、継手の両端が引張られ、曲げモーメントが作用することにより生じる部材間の摩擦のみを考慮した簡便なモデルを用い、初期状態における全ての部材の内部応力を 0 とし、継手の両端を x 軸と平行にそれぞれ 0.1mm まで少しずつ変位させることにより行った。各部材は計算時間短縮のため弾完全塑性体とし、摩擦条件にはクーロン摩擦を適用した。

Fig.14 Fracture and maximum tensile force of double shear joint in case of using washers

図 16 は、継手の両端を 0.1mm まで変位させた場合の最大主応力の分布を示している。まず、継手の変形後の形状から、ワッシャーを用いた場合と用いない場合の両方において、曲げモーメントの作用によりリベット軸が傾くとともに板と板の接合面に開きが生じる現象が確認できる。最大主応力は、ワッシャーを用いた場合と用いない場合の両方において、大まかに、リベット軸に押しつぶされる側の穴周辺は圧縮応力の分布、引張られる側の穴周辺は引張応力の分布となっている。これは 3・4 の理論的考察におけるモデル図の図 13 と対応しており、3・4 の理論的考察の妥当性を裏付けているものと考えられる。この結果から、ワッシャーを用いた場合は、ワッシャーと板との接触部付近一帯が圧縮応力の分布となっており、この圧縮応力が板の穴の拡大を抑制する効果をもたらすものと考えられる。そこで次にワッシャーにより板の穴周囲の塑性変形を検討した。図 17 は、板の穴内のリベット軸側面と接触している Node1 および Node11 における（相当）塑性ひずみと板の端面の変位との関係を表したものである。Node1 および Node11 は、図 15 中に示すように、共に板の穴内にある $y=0$ 面上の節点で、Node1 は板と板の接合面上にある節点、Node11 は板穴の上側の縁にある節点である。この図から、ワッシャーを用いた場合は、板の穴縁の塑性ひずみがワッシャーを用いない場合よりも小さくなることがわかる。特に、ワッシャーと接している Node11 の塑性ひずみが小さく抑えられていることが確認できる。なお、有限要素解析によると、ワッシャーを用いない場合の塑性ひずみは、Node11 付近だけではなく Node1 付近も大きい。これは曲げモーメントが作用してリベット軸が傾くことにより板が開きだすと下面の穴縁が強く圧縮されるためと考えられる。以上のことから、簡便なモデルの解析

Fig. 15 FEM model for tensile test of joint

Fig. 16 Maximum principal stress distributions

Table 2 Computational conditions	
Method	3-D small elastic-plastic analysis
Materials	Elastic-perfectly-plastic(all materials)
Yield stress	Plates(62MPa), Rivet(90MPa), Washers(150MPa)
Young's modulus	Plates and Rivet(70GPa), Washers(100GPa)
Poisson's ratio	0.3 (all materials)
Friction condition	Coulomb friction, $\mu = 0.3$ (all between material and material)

Fig. 17 Increase of equivalent plastic strain at Node1 and Node11

結果ではあるが、ワッシャーにより板の穴周囲の塑性変形が小さく抑えられる効果があることを確認できた。

4. 結 言

本研究では、板のひずみや反りなどの変形を小さく抑えつつ高い締結強度を得ることを目的として、先ずリベット材と板材の硬度および変形抵抗の違いに着目し、リベット材と板材の組合せを変えてリベット締結を行い、継手の変形と強度について検討した。その結果から、次のような問題点があることを明らかにした。

- (1) リベット材と板材の硬度および変形抵抗が同じ程度の場合、およびリベット材の硬度が板材よりも高く、変形抵抗も相対的に大きい場合において、過大なリベット軸の太りが生じやすく、継手の変形が大きくなりやすい。
- (2) 継手の変形を小さくするためには、リベット締め荷重を小さくする必要があるが、リベット締め荷重を小さくすると高い締結強度は得られない。

次に、これらのリベット材と板材の組合せにおいて生じる問題点を改善するために、ワッシャーを用いてリベット締結する方法を提案し、その効果について実験および有限要素解析から検討した。その結果から、

以下のことを明らかにした。

- (3) 単せん断重ね継手の場合には、ワッシャーを用いて板を締結することにより、過大なリベット軸の太りを抑えるとともに、板の寸法変化と反りを小さくすることができる。また、ワッシャーにより板の穴周囲の破壊が抑制され継手の強度が増加する。なお、ワッシャーを用いて板を締結する場合は、ワッシャーが変形しないことが要件となる。

文 献

- (1) Kinoshita, H. et al., Mechanical Engineering Congress of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 6, No. 06-1 (2006), pp. 173-174.
- (2) Kinoshita, H. et al., DISTORTION AND JOINT STRENGTH OF RIVETED PLATES, Proceedings of ASMP2006, (2006), p.112.
- (3) Masuko, M., Machine Design, (1985), pp.71-92, Yokendo Co. Ltd.
- (4) Watanabe, N., Bridge Engineering, (1974), pp.260-261, Asakura Publishing Co. Ltd.
- (5) Simada, S., Design of steel structure (Rivet joint) <http://www.nakanihon.co.jp/gijyutsu/Shimada/shimadato.html>
- (6) Kawada, M., Machine Element Design, (1968), pp.59-60, Kyoritsu Shuppan Co. Ltd.