

アルミニウム合金板摩擦接合継手の ボルト径と最小板厚の関係

ALST 研究レポート 33

2013 年 10 月

大阪大学大学院工学研究科
吉野浩祐, 大倉一郎

概要

本研究は、アルミニウム合金板摩擦接合継手の連結板にへこみを生じさせない、ボルト径と最小板厚の関係を、FEM解析により明らかにする。

目次

第 1 章 序論	1
第 2 章 連結板にへこみを生じさせない条件	3
第 3 章 接触面圧力	4
3.1 座金に作用する圧力	4
3.2 FEM による摩擦接合継手の軸対称解析	5
3.3 連結板と母材に生じる接触面圧力	9
第 4 章 結論	11
参考文献	12

第1章 序論

2000年頃から、軽量かつ耐食性が高いことから、アルミニウム歩道橋や歩道用アルミニウム床版が建設されるようになってきた¹⁾。さらに、道路橋用のアルミニウム床版が開発され^{2),3)}、その試験施工が2011年に開始された⁴⁾。この様なアルミニウム合金土木構造物の建設においては、一般に、工場で輸送可能な大きさに部材が製作され、現場でそれらが組み立てられる。工場での製作には摩擦攪拌接合やMIG溶接が使用され、現場での組み立てには鋼製高力ボルトによる摩擦接合継手を使用される。

現在、我が国では、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⁵⁾。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、めっきの際の熱影響により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。

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た^{3),6)}。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の表面被膜の熱処理は150℃～200℃で実施されるので、フッ素樹脂処理を施す前と同じ等級の軸力をボルトに導入することができる。したがって、フッ素樹脂コート鋼製高力ボルトはF10Tとして使用することができ、これをアルミニウム合金板摩擦接合継手に用いると、溶融亜鉛めっき鋼製高力ボルトを使用する場合より、ボルト本数を減らすことができる。そこで、鋼製高力ボルトにF10Tの軸力が導入された場合に対して、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、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調べられた^{7),8)}。

その後、鋼製高力ボルト摩擦接合継手を有する梁タイプの試験体の疲労試験が実施された。その結果、疲労亀裂はボルト孔の縁に発生するのではなく、ボルト孔周辺の連結板の表面または母材の表面にフレットング（こすれ）疲労亀裂が発生することが明らかにされた⁹⁾。さらに、引張試験片タイプの小型試験片の疲労試験により、ボルト導入軸力、連結板の板厚、応力比がフレットング疲労強度に与える影響が調べられた^{9),10)}。この疲労試験の結果に基づいて、フレットング疲労に対する、アルミニウム合金板摩擦接合継手の設計S-N曲線が提案された¹¹⁾。

現在、アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針の作成が土木学会で進められている。同指針には、高力ボルト摩擦接合継手に関する規定が設けられることになっており、M12、M16、M20、M22、M24の鋼製高力ボルトが考慮される。板厚15mmの母材の両面に板厚8mmの連結板を重ね、これらをM22の鋼製高力ボルトで締結し、F10T相当の軸力が導入された試験^{7),8)}によれば、母材と連結板がA5083-Oの場合、座金直下の連結板の表面にへこみが発生したが、A6061-T6の場合、そのようなへこみは生じなかった。これは、A6061-T6とA5083-Oの0.2%耐力は、それぞれ245MPa、125MPaであり、鋼製高力ボルトの導入軸力に対して、A6061-T6の連結板はA5083-Oのそれより塑性変形しにくいためである。しかし、A6061-T6の連結板においても、ボルト径に対して相対的に薄い連結板を使用すると、鋼製高力ボルトの導入軸力に対して生じる応力が大きくなり、連結板にへこみが生じる可能性がある。疲労荷重などの繰返し荷重に対して、連結板のへこみは、ボルトのゆるみにつながるのを避けられなければならない。

本研究は、アルミニウム合金板摩擦接合継手の連結板にへこみを生じさせない、ボルト径と母材および連結板の最小板厚の関係を、FEM解析により明らかにする。

第2章 連結板にへこみを生じさせない条件

第1章で述べた、疲労試験で使用された引張試験片タイプの疲労試験片を図2.1に示す⁹⁾。母材の板厚は8mmであり、連結板に対して4mm、6mm、8mmの3種類の板厚が考慮された。母材および連結板に使用されたアルミニウム合金は、厚さが4mmと6mmの板に対してA6061P-T6、8mmの板に対してA6061P-T651である。連結板の摩擦面(母材側)に対して、長辺の角を1mm面取りした後、材縁から5mm離れた、内側の部分がブラスト処理された。試験片に使用された鋼製高力ボルトはM20であり、ボルトの孔径は22mmである。F8TとF10Tのボルトの初期導入軸力は、道路橋示方書¹²⁾に規定される設計ボルト軸力の一割増しとし、それぞれ146kN、182kNである。

図2.1に示す試験片に対して実施された疲労試験の過程でボルトにゆるみは観察されなかった。さらに、疲労試験終了後に解体された試験片に、鋼製高力ボルトの導入軸力によるへこみは観察されなかった。したがって、連結板にへこみを生じさせず、ボルトにゆるみを生じさせないことが試験で確認されている。ボルトの軸径と母材および連結板の最小板厚の組合せは、ボルトの軸径が20mm、母材と連結板の板厚がそれぞれ8mm、4mmである。すなわち、ボルトの軸径に対して母材の板厚は0.4倍、母材の板厚に対して連結板の板厚は0.5倍である。

これより、20mmと異なる軸径を有するボルトに対して、連結板にへこみを生じさせず、ボルトにゆるみを生じさせない、ボルト径と母材および連結板の最小板厚の関係として次式を仮定する。

$$t_1 = 0.4d \quad (2.1)$$

$$t_2 = 0.5t_1 \quad (2.2)$$

ここに、 t_1 ：母材の板厚、 t_2 ：連結板の板厚、 d ：鋼製高力ボルトの軸径。

式(2.1)と(2.2)の妥当性を次章で調べる。

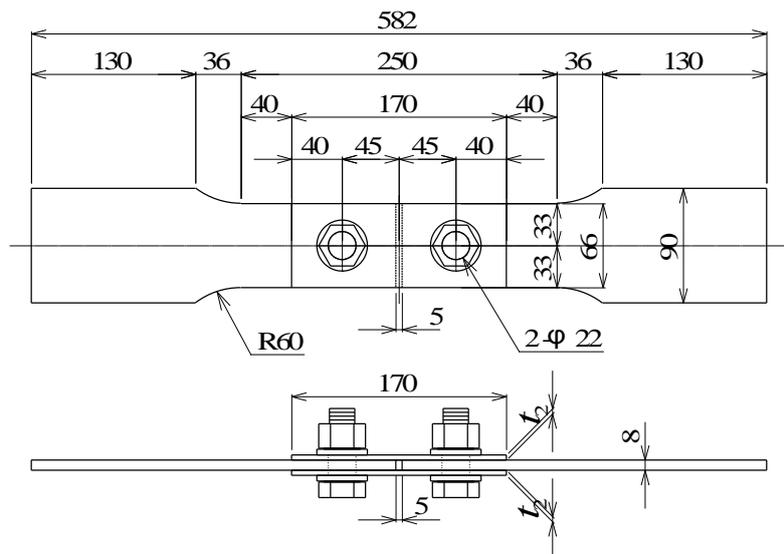


図 2.1 疲労試験片

第3章 接触面圧力

3.1 座金に作用する圧力

アルミニウム合金板摩擦接合継手には、JIS¹³⁾で規定される M12, M16, M20, M22, M24 の鋼製の摩擦接合用高力六角ボルト・六角ナット・平座金のセットが使用される。JIS に規定されるボルトの寸法を表 3.1 に示す。ボルト孔の直径は、次式で与えられる。

$$D = d + 3 \quad (3.1)$$

ここに、 D : ボルト孔の直径 (単位 mm) , d : 高力ボルトの軸の直径 (単位 mm) .

表 3.1 ボルトの寸法

ボルト	d (mm)	d_1 (mm)	d_2 (mm)	d_3 (mm)	d_4 (mm)	D (mm)
M12	12	26	20	16	13	15
M16	16	32	25	20	17	19
M20	20	40	29	25	21	23
M22	22	44	33	27	23	25
M24	24	48	38	29.8	25	27

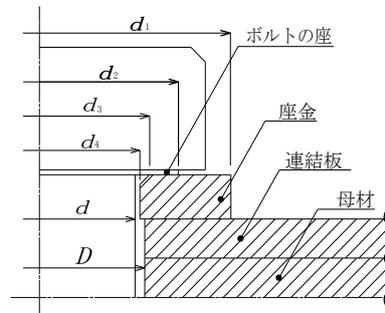


表 3.1 の挿入図を参照して、ボルトの頭の座 (またはナットの座) と座金との接触部は d_2 から d_3 であり、その面積は次式で与えられる。

$$A = \frac{\pi}{4} (d_2^2 - d_3^2) \quad (3.2)$$

ここに、 A : ボルトの頭の座 (またはナットの座) と座金との接触面積, d_2 : ボルトの頭の座 (またはナットの座) と座金との接触部の外側の直径, d_3 : ボルトの頭の座 (またはナットの座) と座金の接触部の内側の直径。

F10T の設計ボルト軸力 N_d は次式で与えられる。

$$N_d = \alpha \sigma_{s0.2} A_s \quad (3.3)$$

ここに、 α ：ボルトの 0.2%耐力を低減するための比率 (=0.75)， $\sigma_{s0.2}$ ：摩擦接合用鋼製高力ボルトの 0.2%耐力 (=900MPa)， A_s ：摩擦接合用鋼製高力ボルトのねじ部の有効断面積。

設計ボルト軸力 N_d の 1.1 倍をボルトの初期導入軸力とすると、座金に作用する圧力 p が次式で与えられる。

$$p = \frac{1.1N_d}{A} = \frac{1.1\pi N_d}{4} (d_2^2 - d_3^2) \quad (3.4)$$

各ボルトに対する A ， A_s ， N_d ， p の値を表 3.2 に示す。座金に作用する圧力は、M20 の場合が最も大きい。

表 3.2 座金に作用する圧力

ボルト	接触面積 A (mm ²)	有効断面積 A_s (mm ²)	設計ボルト 軸力 N_d (kN)	圧力 p (MPa)
M12	113.1	84.3	56.9	553
M16	176.7	157	106	662
M20	169.6	245	165	1073
M22	282.7	303	205	799
M24	436.6	353	238	600

3.2 FEM による摩擦接合継手の軸対称解析

ボルトの初期導入軸力に対して、座金と連結板の界面および連結板と母材の界面に生じる圧力、すなわち接触面圧力を調べるために、汎用 FEM 解析プログラム DIANA¹⁴⁾を用いて、弾性範囲の軸対称解析を行う。解析対象を図 3.1 に示す。解析対象はボルト孔の中心軸、すなわち、 z 軸を回転軸とする軸対称モデルである。ボルトおよびナットは解析結果に影響を与えないと考えられるので、これらを考慮していない。さらに、上下対称の境界条件を $z=0$ に与える。M12, M16, M20, M22, M24 の各ボルトに対して、 d_1 , d_2 , d_3 , d_4 , D の値は、表 3.1 に示す値である。各ボルトに対する座金の厚さおよび母材と連結板の板厚を表 3.3 に示す。座金の厚さは、JIS¹³⁾に規定される値であり、母材と連結板の板厚は、式(2.1)と(2.2)により計算される値である。連結板の半径 40mm および母材の半径 60mm は、後で述べる様に、座金と連結板の界面、および連結板と母材の界面が離れる位置の半径より、十分に大きい値である。各ボルトに対して、表 3.2 に示す圧力 p を座金の上面の d_2 から d_3 の範囲に与える。他方、アルミニウム合金板のヤング係数とポアソン比をそれぞれ 70GPa, 0.3 とし、座金のヤング係数とポアソン比をそれぞれ 200GPa, 0.3 とする。

M12, M16, M20, M22, M24 の各ボルトに対する要素分割を図 3.2 に示す。使用した有限要素は 4 節点アイソパラメトリック軸対称ソリッドリング要素 (DIANA の要素タイプ Q8AXI) である。1 要素の大きさは 0.1mm×0.1mm である。

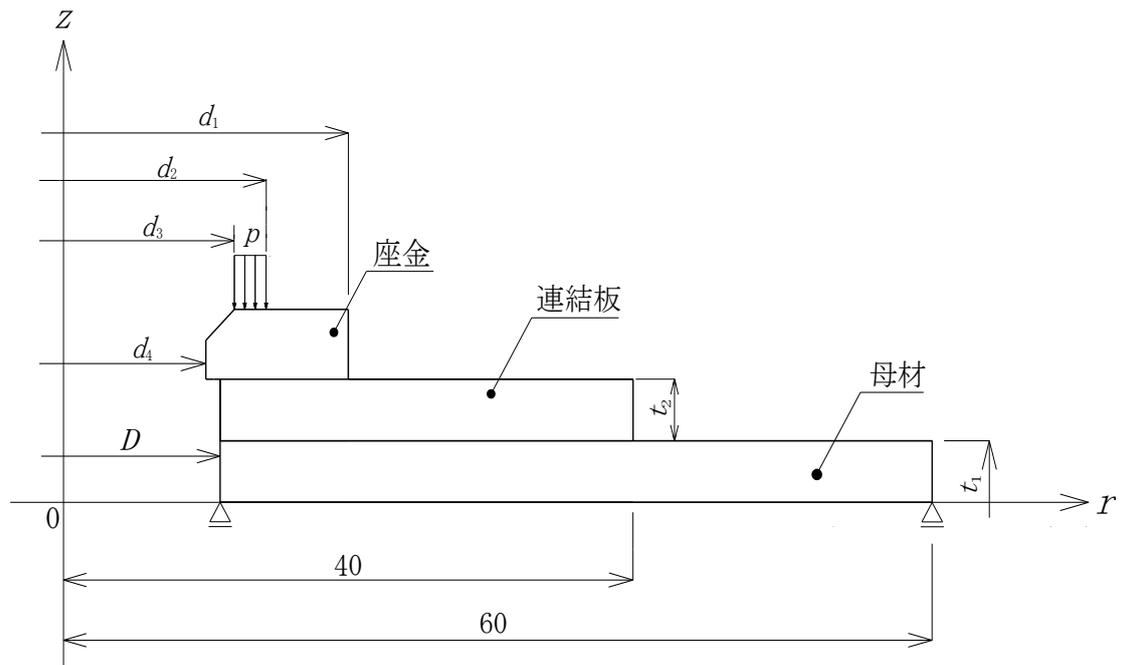
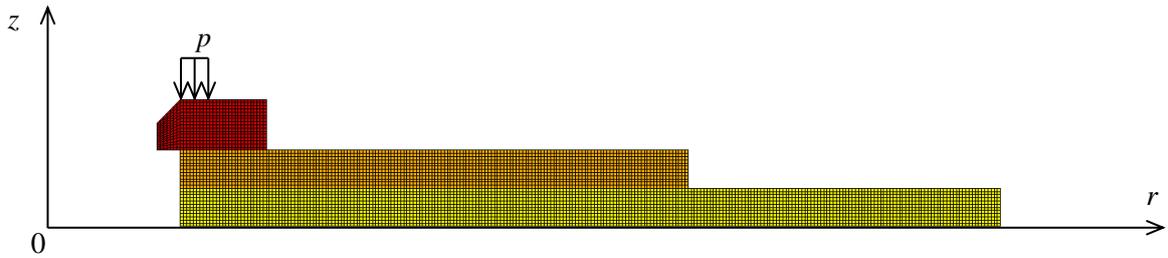


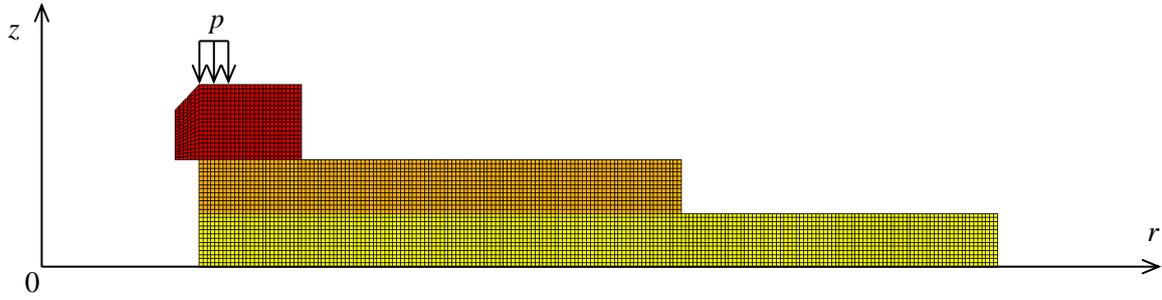
図 3.1 解析対象

表 3.3 座金の厚さおよび母材と連結板の板厚

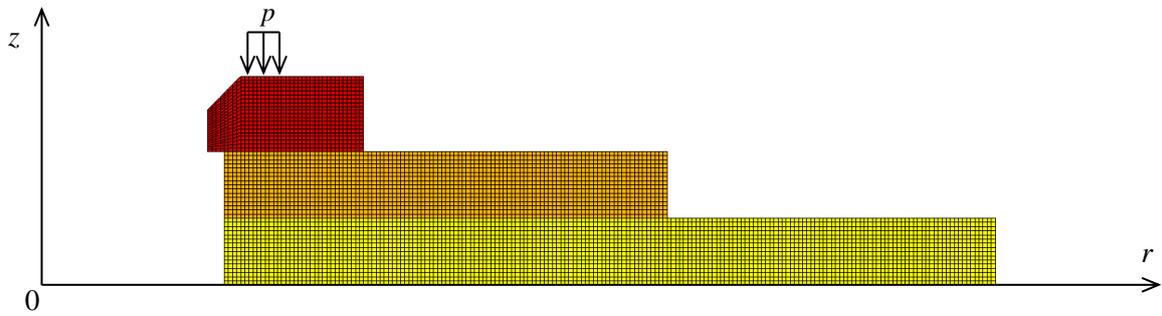
ボルト	板厚(mm)		
	座金	連結板	母材
M12	3.2	2.4	4.8
M16	4.5	3.2	6.4
M20	4.5	4	8
M22	6	4.4	8.8
M24	6	4.8	9.6



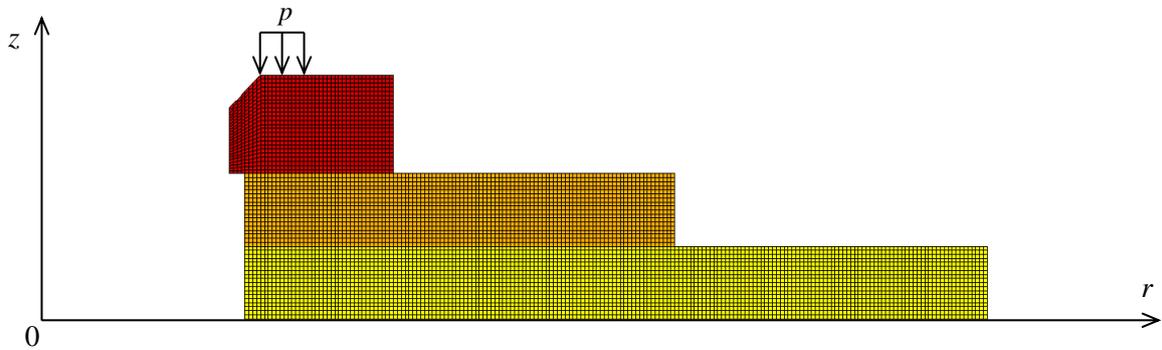
(a) M12



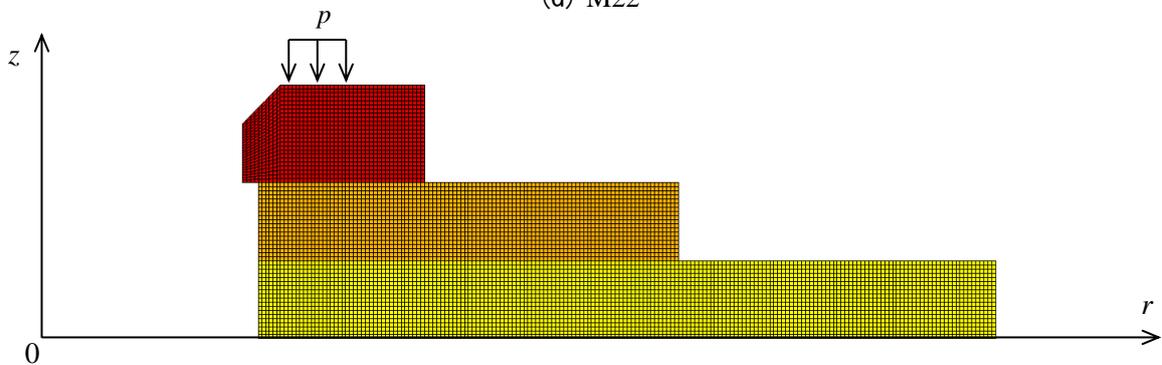
(b) M16



(c) M20



(d) M22



(e) M24

图 3.2 要素分割

座金に作用する圧力の直下では、座金と連結板、および連結板と母材は、互いに押合うが、そこから離れると、両者はそれぞれ離れる。座金と連結板、および連結板と母材がそれぞれ離れる位置を、次に述べる方法で決める。

D から d_2 の間の、座金と連結板の界面、および連結板と母材の界面の節点を共有させ、 d_2 から外の節点を重複させる。この要素分割に対する計算結果を図 3.3 に示す。これは、M20 のボルトに対するボルト孔周辺の変形である。10 倍の変形倍率で、座金を赤色、連結板を橙色、母材を黄色で表している。図 3.3(a) と (b) から分かるように、座金と連結板、および連結板と母材がそれぞれ交差している。そこで、交差した界面の重複節点を内側から順番に、一つずつ共有節点にして再計算を行い、界面の交差がなくなるまでこれを繰り返す。界面の交差がなくなった変形を図 3.4 に示す。各ボルトに対する、座金と連結板の接触部の半径および連結板と母材の接触部の半径を表 3.4 に示す。

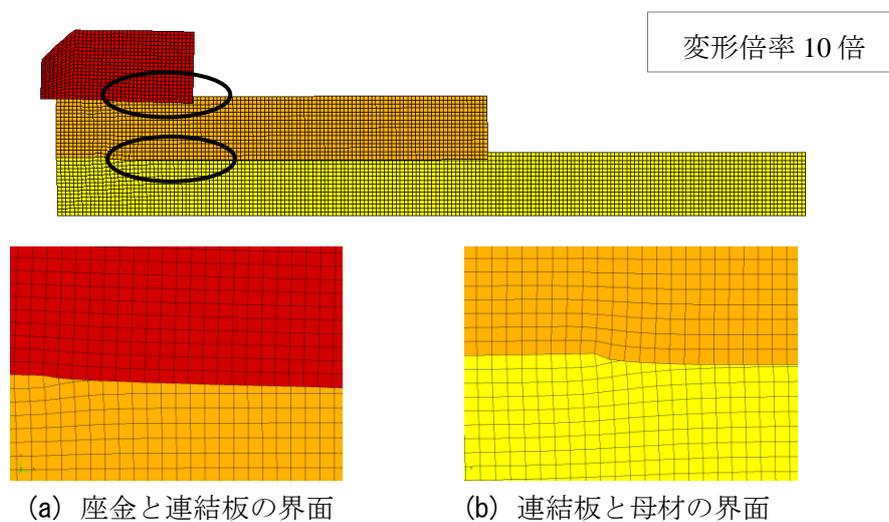


図 3.3 ボルト孔周辺の変形 (M20)

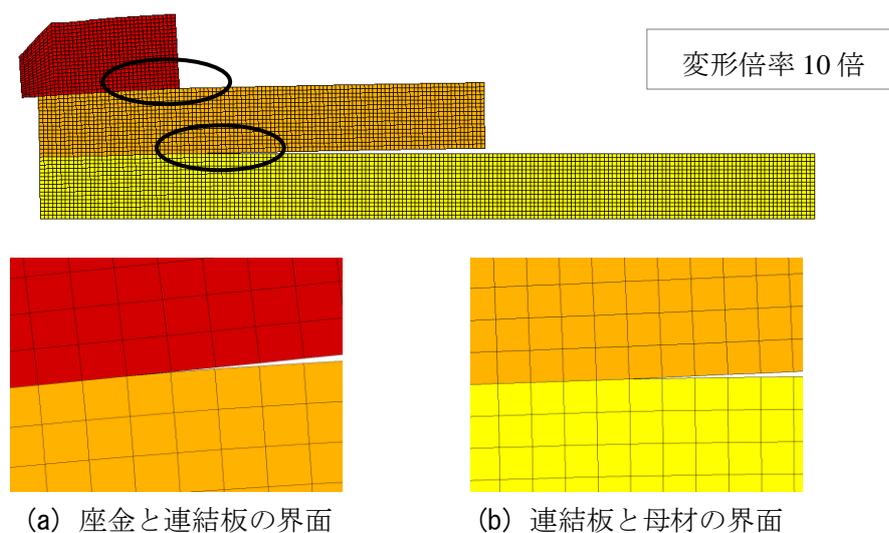


図 3.4 界面の交差がなくなったボルト孔周辺の変形(M20)

表 3.4 接触部の半径

ボルト	座金と連結板の 接触部の半径 (mm)	連結板と母材の 接触部の半径 (mm)
M12	12.5	13.6
M16	16	17.6
M20	18.8	20.7
M22	21.8	23.9
M24	24	26.4

3.3 連結板と母材に生じる接触面圧力

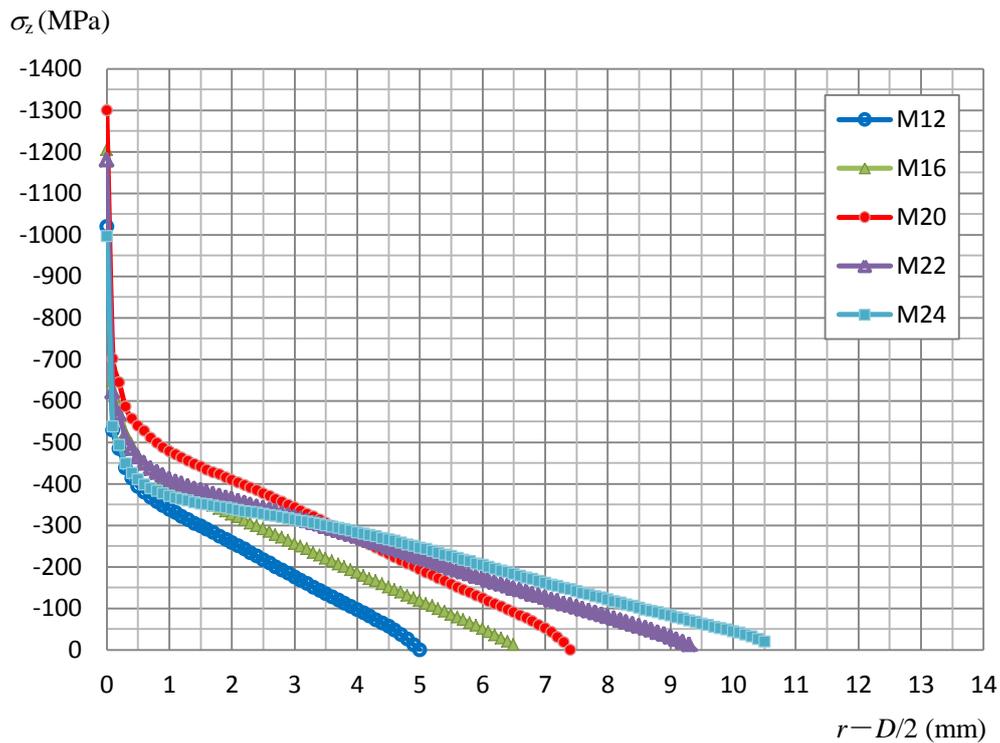
ボルトの初期導入軸力によって、座金と連結板の界面および連結板と母材の界面に生じる接触面圧力 σ_z の分布をそれぞれ図 3.5(a), (b) に示す。横軸には $r-D/2$ が採られている。すなわち、ボルト孔の縁を座標の原点としている。

図 3.5(a) に示すように、M12 と M16 のボルトの座金と連結板の界面に生じる接触面圧力の分布は、M20 のボルトのそれより低い。第 2 章で述べたように、M20 のボルトには、座金直下の連結板の表面にへこみが生じたので、M12 と M16 のボルトの座金直下の連結板の表面にへこみは生じないであろう。M22 と M24 のボルトの場合、ボルト孔の縁から 4mm 以上の範囲で、座金と連結板の界面に生じる接触面圧力の分布は、M20 のボルトのそれより高いが、ボルト孔の縁から 4mm までの範囲では、M22 と M24 のボルトの接触面圧力の分布は M20 のそれより低い。したがって、M22 と M24 のボルトにおいても、座金直下の連結板の表面にへこみは生じないと考える。

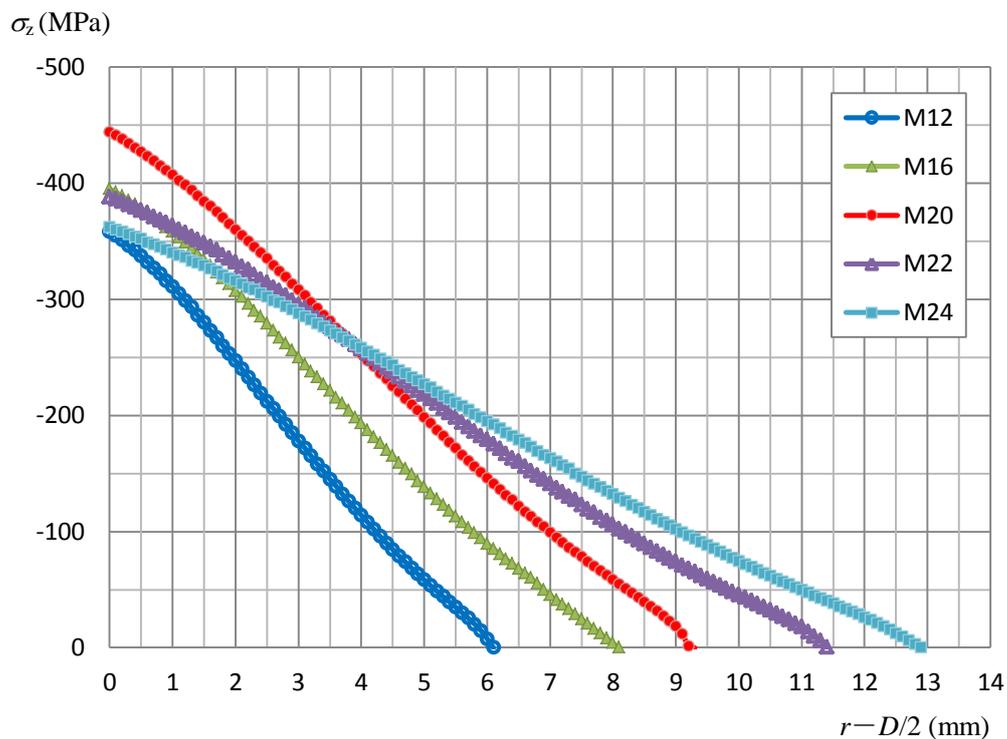
図 3.5(b) に示すように、M12 と M16 のボルトの連結板と母材の界面に生じる接触面圧力の分布は、M20 のボルトのそれより低い。したがって、M12 と M16 のボルトの母材に問題となるような塑性変形は生じないと考える。M22 と M24 のボルトの場合、ボルト孔の縁から 4mm 以上の範囲で、連結板と母材の界面に生じる接触面圧力の分布は、M20 のボルトのそれより高いが、ボルト孔の縁から 4mm までの範囲では、M22 と M24 のボルトの接触面圧力の分布は M20 のそれより低い。したがって、M22 と M24 のボルトにおいても、母材に問題となるような塑性変形は生じないと考える。

以上より、M12, M16, M20, M22, M24 のボルトに対して、式(2.1)と(2.2)は、連結板にへこみを生じさせず、ボルトにゆるみを生じさせない、ボルト径と母材および連結板の最小板厚の関係を与える。

第 1 章で述べたように、A5083-O の連結板には、座金直下の表面にへこみが生じた。したがって、A5083-O の母材に対して、A6061-T6 の連結板を用いることが考えられる。しかし、図 3.5(b) から分かるように、連結板と母材の界面に生じる接触面圧力は、A5083-O の 0.2% 耐力 125MPa をはるかに超える値である。したがって、A5083-O の母材に対して、A6061-T6 の連結板を使用するためには、連結板の板厚を大きくするなどして、連結板と母材の界面に生じる接触面圧力を低減させることを検討する必要がある。



(a) 座金と連結板の界面



(b) 連結板と母材の界面

図 3.5 ボルトの初期導入軸力によって生じる接触面圧力

第 4 章 結論

M12, M16, M20, M22, M24 のボルトに対して, 連結板にへこみを生じさせず, ボルトにゆるみを生じさせない, ボルト径と母材および連結板の最小板厚の関係は次式によって与えられる.

$$t_1 = 0.4d$$

$$t_2 = 0.5t_1$$

ここに, t_1 : 母材の板厚, t_2 : 連結板の板厚, d : 鋼製高力ボルトの軸径.

参考文献

- 1) 鋼構造委員会：21世紀の建設材料 アルミニウム合金の可能性，土木学会平成22年度全国大会研究討論会，研-06 資料，2010.
- 2) 大倉一郎，長尾隆史，萩澤亘保：アルミニウム床版の移動トラックタイヤ載荷疲労試験による疲労耐久性評価，構造工学論文集，Vol.56A，pp.1217-1226，2010.
- 3) 日本アルミニウム協会 土木構造物委員会：道路橋用アルミニウム床版を用いた鋼桁橋－設計・製作・施工ガイドライン，2011.
- 4) アルミニウム橋研究会：蒲原ケミカル橋．<http://alst.jp/str/bridge/kanbara.htm>
- 5) 日本アルミニウム協会 土木構造物委員会：アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案 第1次改訂試案，1998.
- 6) 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），2008.
- 7) 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.
- 8) 大倉一郎，萩澤亘保，長尾隆史：アルミニウム合金板摩擦接合継手における鋼製高力ボルトの軸力低下，構造工学論文集，Vol.56A，pp.827-837，2010.
- 9) 大倉一郎，西田貴裕：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，No.8，2009.
- 10) 大倉一郎，中野崇志：アルミニウム合金板摩擦接合継手の疲労強度，ALST 研究レポート，No.14，2010.
- 11) 吉野浩祐，大倉一郎：アルミニウム合金板摩擦接合継手の設計 S-N 曲線，ALST 研究レポート，No.31，2013.
- 12) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，I 共通編 II 鋼橋編，2012.
- 13) 日本規格協会：JIS B 1186，摩擦接合用高力六角ボルト・六角ナット・平座金セット，2013.
- 14) TNO DIANA：Diana User's Manual – Release 9.4.4，2012.