

下顎骨骨折部のボルト接合に関する研究

(平成7年11月30日 原稿受付)

九州工業大学工学部物質工学科 寺 崎 俊 夫
九州工業大学工学部物質工学科 秋 山 哲 也
産業医科大医学部歯科口腔外科 池 村 邦 男

Study on Joint of Fractured Mandible by Using Bolts

by Toshio Terasaki
Tetsuya Akiyama
Kunio Ikemura

Abstract

The diameter and the number of bolts at the joint of fractured mandible are discussed by using FEM method.

A fractured mandible is mechanically joined with bolts or plates. Usually the diameter and the number of bolts at the joint are decided by a medical doctor and his experience. On the view point of a patient, a small size and a small amount of bolts are comfortable.

FEM method under two conditions, tension and bending, was used for the calculation of stress distributions around a bolt. For the boundary conditions at the interface of a bone and a bolt, a double node method and a soft layer were used.

As the results, the joint that the diameter of a bolt is larger than 2mm and that the number of bolts is larger than 2 and that a distance from the end of a bone is larger than 2mm can sustain a weight of a patient.

1. 緒言

下顎骨骨折は口腔外科領域では日常の治療対象となる疾患であり、治療は観血的に骨折面を接合固定することが多い。大別すると、金属プレートとネジによる骨折合⁽¹⁾、ラグスクリューと呼ばれるボルトによる直接的な骨接合法がある⁽²⁾。骨折部の治癒後、金属プレートやネジ、ボルトなどは再手術によって取り除かれることが多い。

手術は手作業で行われ、熟練した口腔外科医の適切な判断と技術で成し遂げられる。手術される側の立場で考えると、術後の日常生活にできるだけ支障のない手術がなされ、再手術もできるだけ簡単でかつ失敗のないことが望ましい。そのためには、小さく少ない部品で接合が行われかつ強度が保証される必要がある。

近年、医学領域におけるバイオメカックスニの進出には目をみはるものがあり、診断や治療に工学的手法が多く取り入れられるようになってきた。骨折治療における

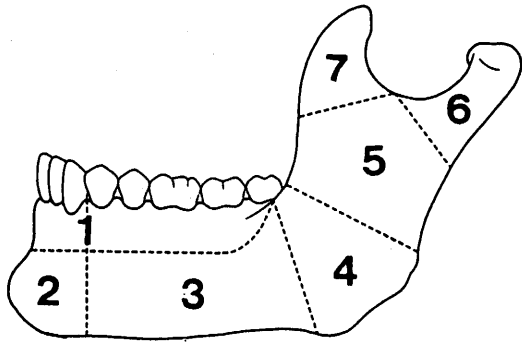
ラグスクリューもその1つであるが、工学的見地から継手の強度に関する検討はあまり成されておらず、経験的判断がなされているようである。手術後の骨折部の強度に関する検討がなされれば、不必要に大がかりな手術を回避することが出来、患者にとって負担の少ない手術とより快適な術後の日常生活を提供することが出来る。

本研究は、手術された下顎骨骨折部を1つの継手とみなし、工学的見地から、必要な継手強度を保証するためのボルトの直径、本数、接合位置について、基礎的な検討を有限要素法で行ったものである。

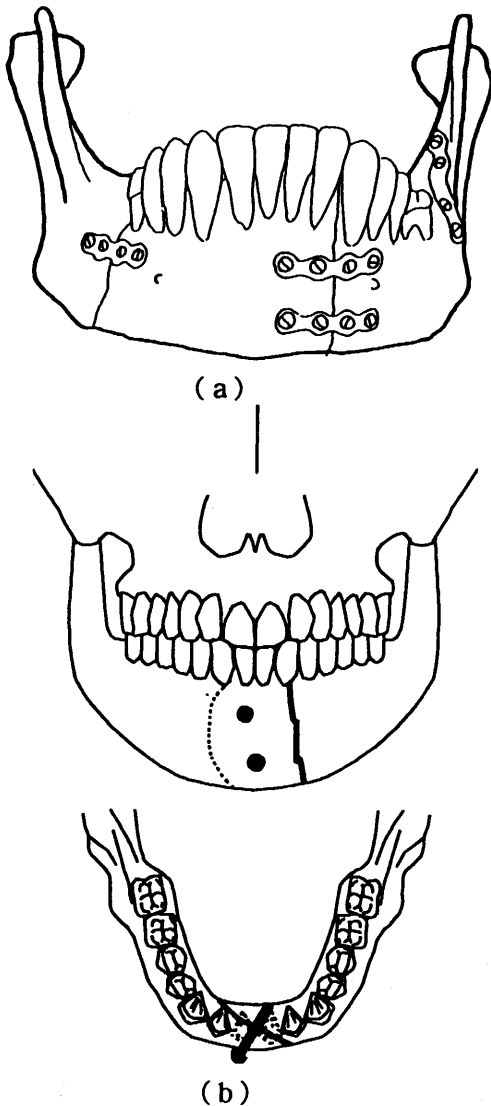
2. 下顎骨骨折と固定方法について

下顎骨は通常図—1に示すような部位に分類されている。これらの中で観血的治療の対象となるのは、オトガイ部(2)、下顎体部(3)、下顎角部(4)、下顎枝部(5)であり、関節突起(6)の骨折には観血的治療に対して賛否両論がある。

観血的治療では図—2(a)に示すプレートとネジを用い



図一 骨折部位の分類



図一 2 固定方法の例

た固定がよく用いられるが、下顎骨が前面と後面（頬舌側）に分離した骨折、骨折線が斜めに走る場合には図一2(b)のボルト（ラグスクリュー）が適応となり、部位別ではオトガイ部(2)、下顎体部(3)に頻用され、下顎角部(4)も適応とする意見がある。ボルト固定はプレートとネジによる固定に比べて、少ない金属で固定できること、両側の骨折片間を直接圧迫することにより、より強固な固定が得られる。

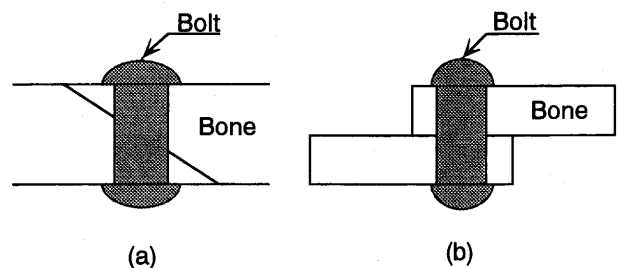
本研究では、図一2(a)、(b)に示す接合方法におけるボルトの位置、本数、直径と接合部の強度の関係を検討した。

3. 有限要素法による局部応力の解析条件

3.1 計算モデル

現実の骨折部はさまざまな破断経路を通り、継手形状は複雑である。ボルトの位置、本数、直径と接合部の強度の関係を基礎的に検討するために、いくつかのモデル化を行った。図一2(b)に示した下顎骨前面部での骨折は、図一3(a)に模式的に示すように斜めに破断する。この形状では、ボルト近傍の応力を3次元解析する必要があるため、(b)に示すように板材の重ね継手に近似し、1枚の板材について、以下に示す図一4、5のモデルで応力分布を計算した。これらのモデルは、図一2(a)の継手形状と類似であるため、図一2(a)の継手の応力分布も計算できる。

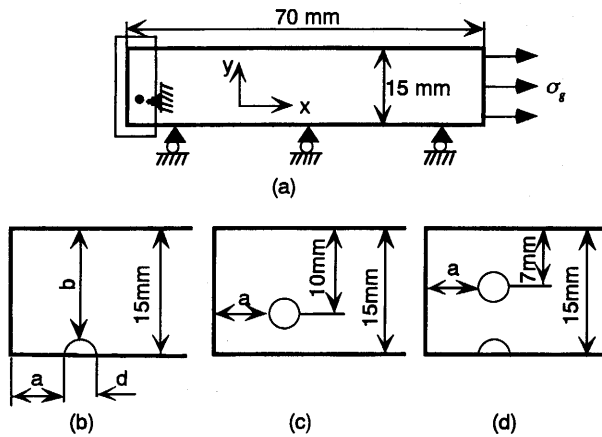
下顎骨は、多くの筋肉や組織で覆われているため、噛む力や噛み方の違いにより、種々の応力分布状態になる^{(4), (5)}。そこで、力学的に代表的な荷重付加形式である軸荷重と曲げ荷重の2条件を選んで、それぞれについて計算モデルを作成した。図一4は、引張条件で用いたモデルを示している。x軸に対して対称形であるので、(a)に示すように、上半分について計算した。ボルト近傍の詳細を(b)、(c)、(d)に示す。板端からの距離をa、ボルト直径をd、ボルトの本数1、2、3本についてそれぞれ(b)、(c)、(d)のモデルで、平面応力条件で計算した。図一5(a)に曲げ条件での計算モデルを示す。左右対称であ



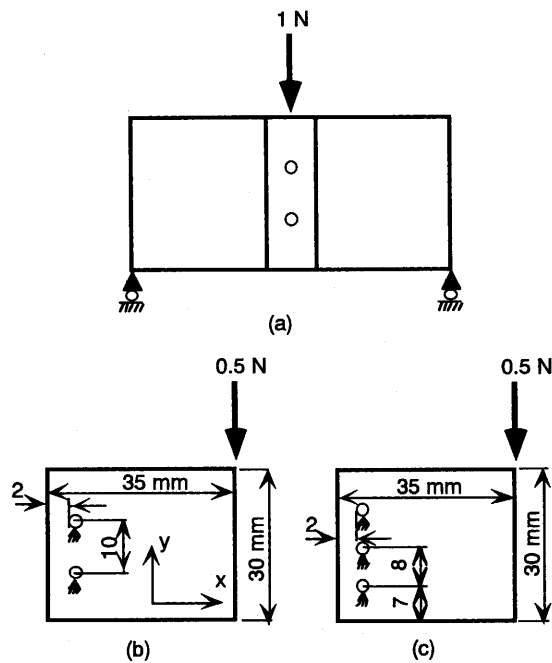
図一 3 ボルト接合部のモデル化

るので、右半分について、ボルトの数が2本と3本の場合についてそれぞれ(b), (c)に示すモデルを作成した。板厚は下顎骨の厚さを参考に5mmとし、スパンは顎関節の距離を参考に70mmとした。

表一に、計算に用いた骨とボルト材のヤング率を示す。また、継手強度の検討に用いた骨とボルト材の強度



図一 4 引張条件における計算モデル



図一 5 曲げ条件における計算モデル

も示す⁽⁶⁾。表より分かるように、骨は圧縮荷重よりも引張荷重に対し強度が小さい。そこで、軸荷重については引張条件のみを計算対象とした。

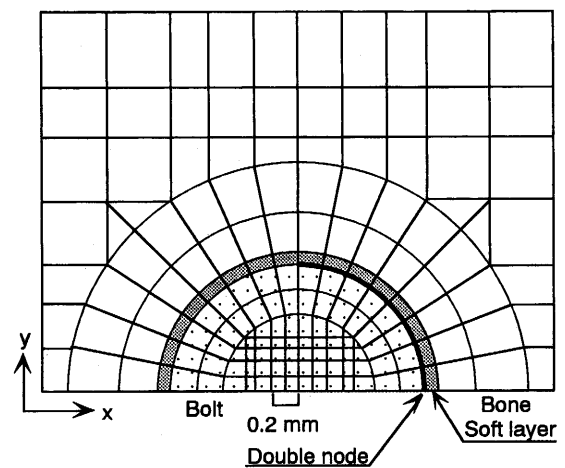
3.2 骨とボルトの境界条件

骨とボルトの界面は互いに結合してはならず、機械的に接触しているだけであるから、接触面に垂直な圧縮応力は界面部で伝達されるが、引張応力は伝達されないと考えられる。また、界面に平行なせん断応力は界面での摩擦が受け持つ程度伝達されるもののほとんど伝達されないと考えられる。この境界条件を満たすために、図一6にボルト近傍の要素分割を示すように、二重節点と軟層を用いた。図中、ボルトの右半分に二重節点を設け、骨からボルトに引張応力が界面を通して伝達されることを防いでいる。軟層の厚さは0.1mm、ヤング率は鋼のヤング率の約20分の1の100MPaとした。なお、本研究に用いた有限要素法プログラムは、円孔の応力分布の問題で、誤差4%以下であることを確認している。

4. 計算結果および考察

4.1 境界条件の妥当性

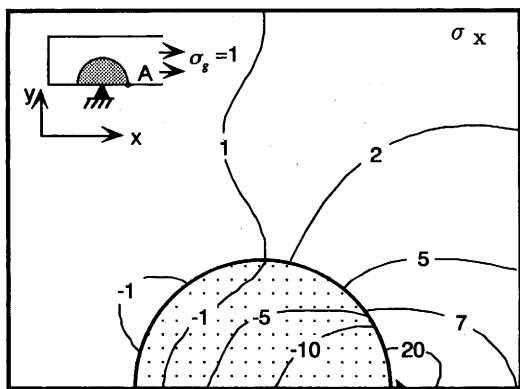
骨とボルトの界面の境界条件の妥当性についてまず検討した。図一7は、二重節点の有効性について、 σ_x に注目して調べた結果である。図(a)は、軟層も二重節点もない場合、(b)は図中のB点から右側の界面に二重節点の



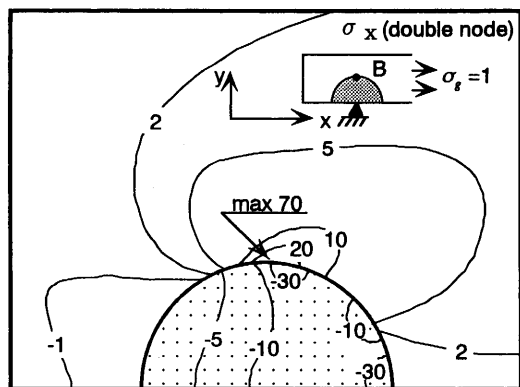
図一 6 ボルトと骨の界面での境界条件

表一 骨とボルト材の機械的性質

	Tensile strength (MPa)	Compressive strength (MPa)	Young's modulus (GPa)
Bone	80 ~ 160	130 ~ 280	20
Ti6Al4V	930		100



(a)

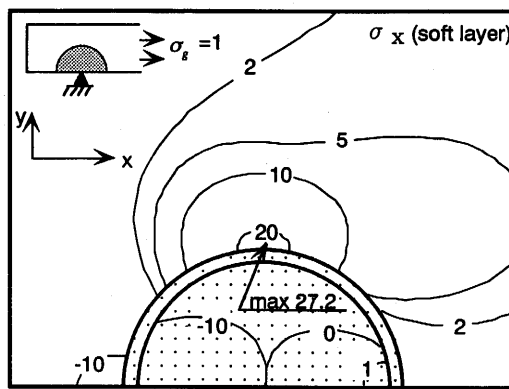


(b)

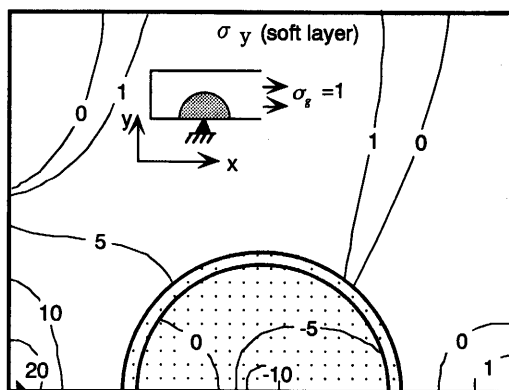
図一七 二重節点の有無による応力分布の比較

みを設けた場合の σ_x の分布を示している。ボルトの中心を固定し、骨を右に引っ張っているため、図(a)中のA点はボルトと骨の間に隙間が生じるように変形すると考えられるが、図(a)ではA点に40と大きな引張り応力が生じている。これは、(a)の要素分割では、A点で骨とボルトが結合しているためである。図(b)では、二重節点が設けてあるため、A点での引張り応力は消滅している。一方図(b)中に示すB点に70と大きな応力が生じていることが分かる。二重節点は界面にき裂が生じているのと同じ働きをするため、B点はき裂の先端に相当し、このため大きな応力が生じている。後掲の図一八(a)は、二重節点と軟層がともに存在する条件で計算した場合の σ_x の分布を示している。図一七(a)に見られたA点の大きな引張り応力、図一(b)に見られたB点の大きな応力集中が解消されていることが分かる。以上のことから、二重節点と軟層を設けることで、引張り応力を伝達せず、界面に垂直な応力成分のみを伝える界面の条件が実現されたことがわかる。

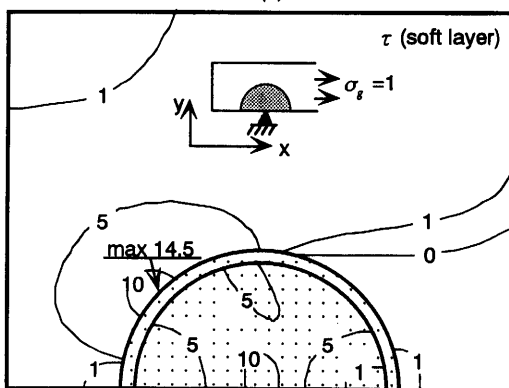
なお、ボルトに設ける拘束点の位置の影響を調べた結果、ボルトの中心を拘束した場合とボルトの端を拘束した場合は、両者の応力分布はほとんど同じであった



(a)



(b)



(c)

図一八 ボルト周辺の応力分布

め、以後の計算は、二重節点と軟層を設け、ボルトの中心を拘束する条件で行なった。

4.2 引張条件下での局部応力

4.2.1 最大応力発生位置

ボルト本数が1本、引張条件を用いて、ボルトの周辺の局部応力の分布を調べた結果を図一八に示す。ボルト直径 $d = 2\text{ mm}$ 、板端からの距離 $a = 1\text{ mm}$ の条件で計算した。(a)はx軸方向の垂直応力 σ_x 、(b)は σ_y 、(c)はせん断応力について示している。応力の最大値は σ_x で現れている。一方、図一三に示したように、計算に用いた接合部形状は実際の骨折部の形状とは異なる。ラグスク

リユーを用いる場合 (図-2(b)) の骨折部の形状は σ_y の最大値が発生する部分は板厚が薄くなっている。したがって図-2(a)に示した接合方法では σ_x が、図-2(b)に示した骨折部の継手では、 σ_y による破壊が問題になると考えられる。

4.2.2 最大応力値に及ぼすボルト位置の影響

図-9(a)に、 σ_y の最大値に及ぼす板端からの距離 a の影響を示す。 a が大きくなるほど $(\sigma_y)_{max}$ が小さくなることからわかる。 a が 1 mm 以上では、直径が 1 ~ 4 mm

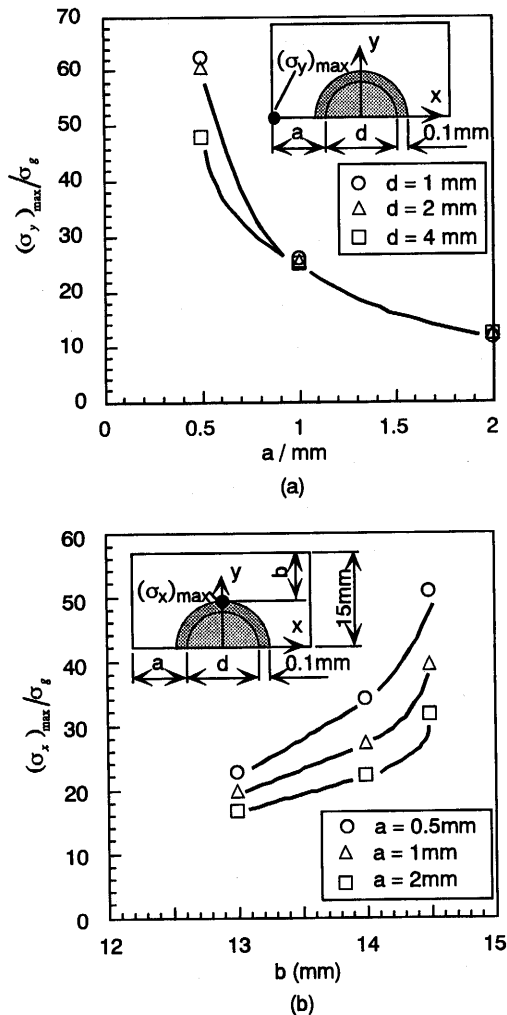


図-9 最大応力値に及ぼす板端距離の影響

と変化しても $(\sigma_y)_{max}$ に及ぼす d の影響は小さく、もっぱら a で整理できることが分かる。図-9(b)は、 $(\sigma_x)_{max}$ について調べた結果である。 a が大きくなると $(\sigma_x)_{max}$ は小さくなっている。図(a)と異なり、プロット点が一致する点がなく、 $(\sigma_x)_{max}$ は a のみでは整理できないことが分かる。横軸 b はリガメント部の長さである。

前項で、図-2(a)の継手では σ_x による破壊が問題となることを述べた。したがって、ボルトの本数が同じとき、図-2(a)の継手では板端からの距離 a とリガメント部の長さの両方を考慮する必要があることが分かる。一方、図-2(b)の継手では、 σ_y が問題であると考えられたことから、板端からの距離 a が 1 mm 以上では、ボルトの本数が同じとき、 a のみを考慮すれば良いことが分かる。

4.2.3 最大応力値に及ぼすボルト本数の影響

引張条件における $(\sigma_y)_{max}$ と $(\sigma_x)_{max}$ の計算結果をまとめて表-2に示す。ボルト直径、板端の距離 a が等しいとき、ボルト本数が増加すると、 $(\sigma_y)_{max}$ と $(\sigma_x)_{max}$ は低下することが分かる。おむねボルト本数に反比例している。

4.3 曲げ条件下での局部応力

曲げ条件下での計算結果を表-3にまとめて示す。板端からの距離 a が増加するほど応力値は低下している。特に $(\sigma_y)_{max}$ で顕著である。また、同一接合条件では、 $(\sigma_y)_{max}$ の方が $(\sigma_x)_{max}$ より、本計算条件の範囲内では、大きい。したがって、曲げ条件下では、引張条件下の場合と異なり、図-2(a), (b)どちらの接合方法でも、接合部の破壊には σ_y が問題となると考えられる。

表-3 曲げ条件下での最大応力値

	a = 1 mm		a = 2 mm	
	2 bolts	3 bolts	2 bolts	3 bolts
$(\sigma_x)_{max}$ (MPa/N)	0.08	0.06	0.06	0.05
$(\sigma_y)_{max}$ (MPa/N)	0.15	0.11	0.08	0.06

表-2 引張条件下での最大応力値

	d = 2 mm						d = 1 mm	
	a = 1 mm			a = 2 mm			a = 1 mm	
	1 bolt	2 bolts	3 bolts	1 bolt	2 bolts	3 bolts	1 bolt	2 bolts
$(\sigma_x)_{max}/\sigma_g$	27.2	14.4	9.8	22.0	11.5	7.9	39.4	15.5
$(\sigma_y)_{max}/\sigma_g$	25.5	13.3	8.7	12.1	5.7	3.6	26.1	10.1

4.4 ボルト接合条件について

下顎骨接合継手の破壊は、局部応力 σ_{local} が限界の応力 σ_{cr} を上回ったとき生じると考えて、破壊条件として $\sigma_{local} = \sigma_{cr}$ (1) とした。

引張条件のとき、引張荷重を P_T 、断面積を S とすると、 $\sigma_g = P_T / S$ (2)

である。また、表—2 に示した値は σ_g に対する σ_{local} の比率すなわち応力集中率 K_t であるから $\sigma_{local} = K_t \sigma_g$ (3)

である。式(1), (2), (3)と $S = 5 \times 30 = 150\text{mm}^2$ を用いて許容荷重を求めることができる。

曲げの場合の破壊条件も式(1)と考えられる。また、表—3 に示した値は、下顎の中央部（前歯の部分）に 1 N が加えられたときの局部応力の最大値であるからこの係数を α 、荷重を P_B とおくと

$$\sigma_{local} = \alpha P_B$$

となる。

式(1), (4)より、曲げの場合の許容荷重を求めることができる。

σ_{cr} に、表—1 に示した骨の強度 80MPa を用いて求めた許容荷重を表—4, 5 に示す。表—4 は、引張条件では σ_x について、曲げ条件では σ_y についてをまとめたもので、図—2(a)の継手の破壊に対応する。表—5 は、 σ_y についてまとめたもので、図—2(b)の継手の破壊に対応する。

人が物を噛むとき下顎に働く力は高々体重程度で 600 N と考えられる。また、下顎に生じる歪み分布を検討した報告⁽⁴⁾では、骨に生じるひずみ量と荷重の間に比例

関係の成立する 100N までの荷重について検討されている。そこで、許容荷重を 100N として考えると、表—4, 5 中の数値はすべて 100N より大きく、すべて条件を満たしている。安全率を 3 と仮定しても、表—4, 5 中の数値は 100N より大きく、条件を満たしていることが分かる。患者自身の体重相当の荷重を顎で支える場合を考えても、表—4, 5 中で 600 (N) 以上の値を示している継手は条件を満足することになる。板端からの距離 2 mm 以上、ボルト本数 2 本、ボルト直径 2 mm 以上で患者自身の体重を支えることが出来ることが分かる。

5. 結 言

手術された下顎骨骨折部を 1 つの継手とみなし、工学的見地から、必要な継手強度を得るためのボルトの直径、本数、接合位置について、有限要素法を用いた力学計算から基礎的な検討を行った結果、以下の結論を得た。

- 1) 水平方向に x 軸、垂直方向に y 軸をとったとき、水平方向の引張荷重に対し、最大応力はボルトの上部の σ_x で生じる。この最大応力は、板端からの距離が大きくなるほど低下する。
- 2) 板の端部ほど板厚が薄くなるラグスクリュー継手で重要と考えられる板端部の σ_y の最大値は、板端からの距離が 1 mm 以上ではボルト直径の影響をあまり受けず、板端からの距離の増加にともない、おおむね反比例して低下する。
- 3) 曲げ荷重に対しては、最大応力値は板端部の σ_y で生じる。
- 4) 局部応力が骨の強度を越えたとき破壊が生じると

表—4 金属プレートを用いた接合条件での許容荷重 (N)

	d = 2 mm						d = 1 mm	
	a = 1 mm			a = 2 mm			a = 1 mm	
	1 bolt	2 bolts	3 bolts	1 bolt	2 bolts	3 bolts	1 bolt	2 bolts
Tension	441	833	1224	545	1043	1518	304	774
Bending	-	533	727	-	1000	1333	-	-

表—5 ラグスクリューを用いた接合条件での許容荷重 (N)

	d = 2 mm						d = 1 mm	
	a = 1 mm			a = 2 mm			a = 1 mm	
	1 bolt	2 bolts	3 bolts	1 bolt	2 bolts	3 bolts	1 bolt	2 bolts
Tension	470	902	1379	991	2105	3333	921	1188
Bending	-	533	727	-	1000	1333	-	-

考えて、許容荷重に100Nを用い安全率を3とした場合、板端からの距離が1mm以上でボルト本数が2mm、ボルト本数が2本以上の条件であれば、引張、曲げの両方の荷重条件に対し、十分に耐えられる。患者の体重を顎で支えることを考えた場合でも、板端からの距離2mm以上、ボルト本数2本、ボルト直径2mm以上で耐えられる。

参考文献

- (1) Kunio Ikemura, Hideharu Hidaka, Tetsuji Etoh and Katsuki Kabata: J. Oral Maxillofac Surg, 46: 10-14, 1988
- (2) 池村邦男, 日高英次, 藤原利彦, 渡辺真理: 日本口腔外科学会雑誌, Vol. 30, No. 12(1984), pp1938-1943
- (3) 石田誠: き裂の弾性解析と応力拡大係数, 培風館 (1976), p154
- (4) Spiessl, B. and Schroll, K.: Spezielle Fraktur- und Luxationslehre, Band I/1, 1972, Georg Thieme Verlag.
- (5) 岡野雅一: 日大口腔科学, Vol. 15(1989), pp258-275
- (6) 宮永豊: 口腔・災害外科, Vol. 26(1983), pp1483-1491