人工歯根周辺部の振幅荷重下での力学的挙動

— 光弾性による粘弾性的挙動の検討 —

田 中 眞 理 子

九州歯科大学物理学教室 (主任 : 山崎久一教授)

平成 2 年 6 月 29 日受理

Mechanical Behavior of Tissue Surrounding an Implant under Cyclic Loads

— Photoelastic Study on Viscoelastic Behavior —

Mariko Tanaka

Department of Physics (Chief : Prof. Hisaichi Yamasaki)

Kyushu Dental College, Kitakyushu, Japan

The object of this experiment is to analyze by photoelastic methods stress concentrations and distributions around a screw-type implant under cyclic loads and during a stop period. Bone-models were made of a 3-7 mixed polyester which could show the birefringence based on the retarded elasticity more clearly than an epoxy resin. Results were as follows :

1. Stress concentrations were recognized near screw threads and at the apex of the screw.
2. The degrees of stress concentrations were larger under cyclic loads than static loads.
3. The quantity of strain increased as a loading time accumulated.
4. The strains which were yielded by cyclic loads consisted of perfect elastic strains and retarded elastic strains.
5. It took a considerably long stop period before strains ran out completely.

Key words : Implant / Cyclic loads / Stress concentration / Photoelastic method

緒 言

近年医学の分野では人口臓器等の開発が進み、臨床成功率も高くなっている。歯科の領域でも人工歯根について材料、デザイン、安全性等の多方面から研究がなされ臨床にも次第に応用されるようになってきている。歯科で人工歯根を用いる場合に非常に重要なことは、大きな咬合圧が加わったときに、人工歯根の周囲組織がどのように反応し適合していくかであろう。力学的な面では光弾性実験によるモデル解析^{1,2)}、あるいはストレインゲージを用いた骨の歪³⁾等の研究がなされ、組織学的な研

究⁴⁻¹²⁾と対応させて議論がなされている。しかし、これらは咬合圧を静荷重として実験したもので、ある周期をもった動荷重下での考察はほとんどなされていない。そこで著者は、人工歯根に周期性をもった荷重が作用した場合、その周囲組織の応力分布状態がどのように変化するかを二次元光弾性実験で測定したので、その結果を報告する。

実験材料ならびに実験方法

I. 材料および模型の形状・寸法

本実験では動荷重による応力分布状態の時間的変化を

観測する目的のため3-7混合ポリエステルを用いた。これは不飽和酸の多少による2種類のポリエステル、HP (1557) と SP (70 F) とを重量比3:7の割合で混合し、重合触媒と促進剤とを加えて室温で重合硬化させたものである。これを厚さ6 mm, 幅90 mm, 高さ120 mmの半無限板に近い形状に加工し試験片を2種類作成した。1つはネジ型人工歯根の特にネジ山を強調した人工歯根モデルを埋め込んだもので、これを試験片Aとする(図1)。ただしネジ山は極端な応力集中をさけるために適当な曲率をもたせた。もう1つは、実物のネジを埋め込んだもので、これを試験片Bとする。

II. 実験装置および実験方法

実験装置は光弾性実験装置と低速繰り返し引張り試験機とを組み合わせたものである。この低速繰り返し引張

り試験機は引張りによる材料の伸び変形を考慮し、試験片に常に一定の振幅応力が生じるようにコントロールする機能を持たせている。一定時間繰り返し負荷を与え、その直後一定時間無負荷状態で休止させ、再び一定時間繰り返し負荷を与えるということを数回行った。荷重の大きさは60 kgと78 kgの2種類とし、振幅速度は2 Hz, 負荷時間は10分および20分とした。実験中の室温は $30 \pm 2^\circ\text{C}$, 湿度は $65 \pm 5\%$ とした。試験片の応力分布状態の変化の様子は、光弾性装置で単色光光源を用いてモータードライブカメラで連続的に撮影し、試験片の最大引張り応力状態をとらえた。

実験結果

図2は試験片Aに一定時間繰り返し負荷を与えてその直後休止させ、再負荷した場合のネジ周辺部の応力状態の変化を示し、図3は応力分布図の一例である。図2・図3が示すように応力集中はネジ山周辺部に認められ、負荷時間のトータル量が多くなるほど応力集中部分が周囲に拡大していく様子が認められる。また無負荷休止により、応力状態はほぼ負荷前の状態にまで回復していることがわかる。図4は応力集中部位における縞次数の時間的变化を示しており、横軸に負荷および休止の時間を、縦軸に縞次数をとっている。繰り返し引張り状態で現れる縞次数Nの変化量は、繰り返し速度と試験片の温度上昇によって影響を受けるが、本実験で行った低サイクル下では試験片の温度上昇はほとんど認められなかったので考慮を払わなかった。図4 a), b), c) は負荷60 kgで負荷時間を10分、休止時間をそれぞれ2時間、4時間、6時間とった場合のものである。いずれも負荷時間のトータル量が多くなるほど縞次数が増加しており、無負荷休止時間の違いの影響はあまり認められない。図4 d) は負荷78 kgで負荷時間を10分、休止時間を2時間にした場合のものである。高次の縞次数が得られる以外には図4 a), b), c) とほぼ同じ傾向を示している。これに用いた試験片Aは4度目の負荷中にネジの先端部にキレットが入り破壊した。図4 e) は、負荷60 kgで負荷時間を20分、休止時間を6-6-12時間にした場合のものである。休止時間を6時間とった後の負荷では、図4 a), b), c) と同様に縞次数の増加が認められるが、休止12時間後の負荷では縞次数が3.5となり、前回の負荷時の3.8より低下しているのが認められた。

次に、試験片Bを用いて試験片Aに対して行ったのと同様の実験をした。その様子を図5に示す。60 kgの

図1 試験片の形状寸法と負荷方法

a) 静荷重下

b) 20 分間繰り返し負荷

c) 除荷直後

d) 無負荷 6 時間休止後

e) 20 分間繰り返し負荷

f) 除荷直後

図2 ネジ周辺部の応力状態の変化 (P= 60 kg)

図3 ネジ周辺部の応力分布図

引張り静荷重を負荷した場合、応力集中はネジ山部にほんのわずかだけ認められる。しかしネジのピッチが小さいので、ネジ全体の周辺部に一様に応力が分布しているように見える。繰り返し負荷を与えて数分後にネジ先端部にキレツが入り、それが少しずつ進行していった。ネジ山部の応力集中は増大している。一定時間休止させても負荷を与える前の応力状態には戻らなかった。2度目の負荷途中からキレツがだんだん大きくなりついに破壊した。試験片Bによる実験では、いずれの場合も同様の結果を示した。

考 察

人体に作用する外力には静的なものと動的なものがあるが、動的な外力に対して組織がどのような力学的反応を示すかを推測するためにこの実験を行った。本実験では、山田 (1941)¹³⁾、中神 (1949)¹⁴⁾、横尾 (1952)¹⁵⁾、黄 (1953)¹⁶⁾らの報告した骨の力学的性質とタンパク質繊維を約30%含むという骨の組成¹⁷⁾とから、人工歯根周囲の骨組織をある種の高分子であろうと推察した。そうであれば、応力が作用したとき弾性的にふるまう部分と遅延弾性的にふるまう部分があると考えられる^{18,19)}。光弾性実験でのモデル作製用として一般に用いられているエポキシ樹脂は、遅延弾性による複屈折効果が現れにくく、経時的な反応を観測するにはあまり適当なものではない。そこで弾性および遅延弾性による複屈折効果が比較的良く観測でき、しかも安価に手に入るポリエステル樹脂を用いて骨組織のモデルとした。

同じ荷重でも静的な場合と動的な場合とではモデル内の応力集中の度合いが大きく異なっている。このことは、繰り回数の変化を内部の歪の反映と考えると、動的負荷を

受けている間に遅延弾性的歪が増加し、弾性的歪と重なった結果、応力集中度が大きくなったものと思われる。動的負荷により増加した歪は除荷すると同時に50～60%が回復し、残りの歪は休止時間中に負荷前の状態にまでほぼ回復している。すぐに回復するのが弾性的歪、徐々に回復するのが遅延弾性的歪と考えられる。しかし、歪が回復しているように見えても、再負荷によりさらに大きな歪を生じていることから、光弾性的にはとらえられない歪が残留していたか、あるいは負荷を与えられたことによって歪の発生しやすい構造になったものと思われる。それでも休止時間をかなり長くすると歪の増加がおさえられていることから、高分子の歪が完全に回復するには相当量の休止時間が必要だと思われる。ちなみに実際の骨の場合、歪が完全に元の状態に戻るのに、湿潤骨で約10時間、乾燥骨で約24時間かかったと横尾 (1952)¹⁵⁾が報告している。

このように骨を高分子の1種であると仮定して考察してきたが、高分子も分子構造が異なれば違った動向を示すことが多いので、これらの結果がそのまま骨組織の力学的反応を示しているとは言えないかもしれない。しかし定性的にこれと類似の傾向を示すのではないかとと思われる。

さて、人工生体材料とそれに接触する骨組織の改造について山室 (1989)²⁰⁾は、材料と接触している骨組織は静的条件下と微妙な動的条件下とでは組織の形成を異にすると報告している。また川原 (1983)²¹⁾も、外力が周囲組織に作用した場合、人工生体材と骨とのかかわりを骨界面の動的反応として考えなければならないとしている。人工歯根、特にネジ型人工歯根の周囲組織は、外力に対する反応がネジ周辺部に特に顕著に現れ、その部分

a) 10 分間負荷—2 時間休止 (P= 60 kg)

b) 10 分間負荷—4 時間休止 (P= 60 kg)

c) 10 分間負荷—6 時間休止 (P= 60 kg)

d) 10 分間負荷—2 時間休止 (P= 78 kg)

e) 20 分間負荷—6—12 時間休止 (P= 60 kg)

図4 応力集中部位の最大縞次数の時間的变化

a) 静荷重下

b) 10 分間繰り返し負荷

図5 試験片 B による応力状態の変化 (P = 60 kg)

に骨が形成される場合と、線織性被膜が形成される場合と多様な報告⁴⁻¹²⁾がなされている。それらは外力の有無と大きさにもとづくものと考えられているが、因果関係はまだはっきりしていない。杉本(1984)¹¹⁾は、ネジ型人工歯根の周辺部ではネジ部位により結合組織の厚さが異なると報告しており、これらはネジ周辺部の応力分布状態の違いによるものと考えられている。これもただ分布状態の違いだけに起因するのではなく、その時間的な変化も影響を与えているのではないと思われる。

結 論

ネジ型人工歯根に振幅荷重が作用した場合の人工歯根周囲組織の力学的挙動を調べるために、遅延弾性による複屈折効果がエポキシ樹脂より比較的良く観測できる3-7混合ポリエステル樹脂で骨モデルを作製し光弾性実験を行った結果、次のような知見が得られた。

1. ネジ型人工歯根の周辺部ではネジ山近傍とネジ先端部に応力集中が認められた。
2. 振幅荷重による応力集中度は、静荷重下のものよりも大きくなった。
3. 負荷時間が累積されるにしたがって、歪量が増加した。
4. 振幅荷重によって生じる歪は、弾性的歪と遅延弾性的歪との和になっている。
5. 歪の完全回復には相当量の休止時間が必要であ

る。歪が完全に回復すれば再負荷による歪の増加がかなり抑制される。

稿を終るに臨み、試験機の製作から実験の解析まで終始御指導を賜った元山口大学教授三木 教先生ならびに御助言を賜った九州歯科大学物理学教室山崎久一教授に深謝の意を表します。

引用文献

- 1) Munir Z. A., Richards L. W. and Prado M. E.: Photoelastic studies of the stress distributions on blade-type endosteal dental implants. *Oral Implantology* 5 (3): 296-332, 1975.
- 2) 新国俊彦, 西連寺永康, 柳沢定勝, 佐久間雄平, 吉峰一夫, 和泉一清, 酒井正人, 藤尾 昭: 各種の歯科用骨内インプラントの周囲に生ずる応力の2次元光弾性実験法による検討. *日大歯学* 52: 54-67, 1978.
- 3) 塚本勝彦: ブレード・インプラント周囲骨梁のストレインゲージ法による歪みについての研究. *松本歯学* 7: 181-193, 1981.
- 4) 中島知範: 移植義歯を目的とした歯槽骨内インプラントに関する実験的研究. *九州歯会誌* 29 (6): 771-787, 1976.
- 5) 山根稔夫: バイオセラム・サファイア・インプラントの動物実験による臨床的考察. *歯界展望* 50: 1179-1184, 1977.
- 6) 倉地洋一: 人工歯の移植に関する実験的研究. *口病誌* 45: 454-471, 1978.

- 7) 中野楠夫：Implant 応用時の下顎骨の力学的および組織学的変化に関する実験的研究. 歯基礎誌 20：507-520, 1978.
- 8) 村松 力：骨内インプラント周囲結合組織の組織学的研究, Peri-implant membrane の構造について. 松本歯学 8：197-209, 1982.
- 9) McKinney R. V. Jr. and Koth D. L.：The single-crystal sapphire endosteal implant：Material characteristics and 18-month experimental animal trials. J. Prosthet. Dent. 47：69-84, 1982.
- 10) Skalak R.：Biomechanical considerations in osseointegrated prostheses. J. Prosthet. Dent. 49：843-848, 1983.
- 11) 杉本忠雄：バイオセラミインプラントに関する実験的研究. 九州歯会誌 38（1）：1-25, 1984.
- 12) 橋本正毅：機能圧を負荷した単結晶アルミナセラミックインプラント周囲の組織構造に関する実験的研究. 広大歯誌 17：138-153, 1985.
- 13) 山田 博：骨の材料力学的研究. 京府醫大誌 33（1）：263-320, 1941.
- 14) 中神右内：骨組織の圧縮試験に関する基礎的研究. 京府醫大誌 45：393-408, 1949.
- 15) 横尾定美：人の四肢長骨の緻密骨質及び骨幹の圧縮試験. 京府醫大誌 51：291-313, 1952.
- 16) 黄 令喜：人の四肢長骨の緻密骨質の引張試験. 京府醫大誌 53：503-525, 1953.
- 17) 鳥山貞宣：骨・万有百科大辞典 医学（相賀徹夫編）. 小学館, 東京, 1973, 547-550.
- 18) 三木 教：人工複屈折効果. 光弾性学要論. 理工新社, 大阪, 1974, 5-25.
- 19) 三木 教：ポリマーの人工複屈折とその成分の正負性. 光弾性学論文集 3（1）：43-53, 1981.
- 20) 山室隆夫：生体材料と骨形成の様式. 生体材料 7（1）：19-23, 1989.
- 21) 川原春幸：より確かなセラミック・インプラント. 補綴臨床 6（1）：3-19, 1983.