

論文名：三次元弾性論に基づいた積層材料の理論応力解析に関する研究（要約）

新潟大学大学院自然科学研究科

氏名 三浦 鴻太郎

---

（以下要約を記入する）

積層（層構造）材料は工業材料および生体組織などで良く現われてくる材料である。工業材料では耐摩耗性を高めるために被膜層を形成したコーティング材料が積層材として用いられ、生体組織では関節面の摩耗抑制と荷重緩和の役割を有する関節軟骨や皮膚組織等がその例である。この種の積層材料の力学的特性を評価する手法としてはインデンテーション（押し込み）試験法が挙げられる。この方法は、材料を厳密な試験片形状に加工する必要がなく、材料の局所的な部分を使用するだけで力学的特性を評価できることから、今日ではコーティング材料や生体組織等へ適用した研究例が増えている。インデンテーション試験法の基礎理論は、半無限弾性体の自由表面に垂直な集中力が負荷される場合の変位と応力を決定する混合境界値問題であるBoussinesqの問題によって与えられる。

本論文は、Boussinesq の問題より発展してきた積層材料の弾性接触問題とその関連問題の解析的およびその実験応用に関する研究である。

近年、工業材料および生体材料において応用が進んでいる積層構造材料の接触問題に関して、様々な力学条件下での理論解析が行われている。しかし、それらの先行研究における数値計算法は数値計算精度について明らかではなく、数値結果の信頼性が必ずしも示されていない。本研究では、この種の問題に対して、混合境界値問題の連立積分方程式の応力もしくは変位成分を直交多項式で級数展開することによって無限連立一次方程式の解法問題に帰着させる独自の解析手法を用いて理論解析を行った。この解析手法はき裂問題へ適用できるなど、汎用性がある手法であり、数値計算精度についても、係数解の収束性より容易に確認することができるという利点がある。

本論文では、三次元弾性論に基づいて連立積分方程式を無限連立一次方程式の解法問題に帰着させる独自の解析手法を用いることにより、積層材料の静的接触負荷による力学的挙動、層内欠陥を有する材料に生じる特異応力場および粘弾性層の準静的接触負荷に対する力学的挙動を理論解析して、実際の積層材料の設計指針、積層材料のインデンテーション試験法の構築への基礎情報の提供および生体組織が有する力学的特性の物理的解釈のための知見を提供することを目的とした。

本論文は全 7 章から構成されている。

第 1 章は緒論である。ここでは、積層材料の接触問題、き裂問題および粘弾性接触問題に関する先行研究を概観したのち、本研究の背景、意義および目的について述べた。

第 2 章では、物体の応力状態を線形弾性論に基づいて解析するために必要となる三次元

弾性問題の基礎式を誘導した。また、本研究では、調和応力関数によるポテンシャル解析手法を用いるため、応力関数による変位と応力の軸対称弾性基礎式を最終的に導出した。

第 3 章では、層構造材料のインデンテーション試験法に関連して、弾性基礎上に密着した弾性層を剛体円柱状および球状圧子で押込む軸対称弾性接触問題を厳密に理論解析した。また、剛体圧子と弾性層の接触面における垂直応力、弾性層表面の垂直変位等の数値結果を示すとともに、これらに及ぼす弾性層の厚さや弾性層と弾性基礎の力学的特性の影響について明らかにした。その結果、弾性層と弾性基礎の横弾性係数比が 1 より小さい場合と 1 より大きい場合の数値結果の比較から、接触面における垂直応力は前者の方がより高い値を示した。また、弾性層表面変位は横弾性係数の比が大きくなるにしたがって、軸中心から半径方向へ離れていく際の変位の減少が緩やかになり、押し込みによる変形がより広範囲に影響することがわかった。

第 4 章では、力学的特性の異なる異種材料（半無限弾性体）に挟まれた弾性層内部に存在する円形き裂（Penny-shaped crack）の問題を理論解析した。また、弾性層と異種材料の界面状態として、完全固着および摩擦のない状態で接触している場合の二つの極限的な状態を考え、弾性層のき裂開口変位、き裂面における垂直応力およびき裂端における応力拡大係数に対して弾性層の厚さ、弾性層と半無限弾性体の力学的特性および界面状態が及ぼす影響を明らかにした。その結果、弾性層と異種材料の横弾性係数比が 1 より小さい場合と 1 より大きい場合の各種の数値結果の比較から、全ての物理量に関して、後者の場合の方がより大きな値を示した。また、弾性層と異種材料の界面において完全固着している場合と摩擦のない状態で接触している場合のき裂開口変位、き裂面における垂直応力およびき裂端における応力拡大係数のそれぞれの数値結果の比較から、弾性層と異種材料の横弾性係数比の値に関わらず、摩擦のない状態で接触している場合において、各種の数値結果はより高い値となることがわかった。

第 5 章では、厚さ方向に力学的特性が変化する材料のインデンテーション試験を想定し、力学的特性が異なる弾性層が弾性基礎上に積層された多層構造材料の軸対称弾性接触問題を理論解析した。また、各弾性層と弾性基礎の力学的特性分布について、二つの基本的な系として **Hard-coating system** と **Soft-coating system** を想定して、数値計算を行った。そして、剛体圧子と弾性層の接触面における垂直応力、弾性層表面の垂直変位等の数値結果を示すとともに、各弾性層と弾性基礎の力学的特性の影響を明らかにした。その結果、弾性基礎上に積層される弾性層数の増加にともない、**Soft-coating system** では接触面における垂直応力は大きな値を示した。

第 6 章では、有限厚さの線形粘弾性層に関する剛体円柱状圧子による緩和押し込み問題の解析解を導出するとともに、実際に工業用材料としてシリコンゴムとエコーパッドおよび生体組織としてウシ大腿骨頭軟骨を対象として、一定押し込み変位量を与えて、荷重の時間応答を測定する、緩和インデンテーション試験を行い、粘弾性特性の同定を行った。また、軟骨については、変形性関節症（OA）を模擬するため、酵素処理によりコラーゲン線維を破壊した後、再度緩和インデンテーション試験を行い、正常状態との比較を行った。その結果、本実験手法で求められる粘弾性特性を用いることによって、軟骨の変性状態を定量的に評価できる可能性が示唆された。

第 7 章は、本論文の結論であり、本研究で得られた結果を総括した。