

氏名	袁世峰
授与学位	工学博士
学位授与年月日	平成2年3月28日
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械工学専攻
学位論文題目	マンガング塊の採鉱に伴う揚鉱管の静的および 動的挙動に関する研究
指導教官	東北大学教授 谷 順二
論文審査委員	東北大学教授 谷 順二 東北大学教授 阿部 博之 東北大学教授 猪岡 光 東北大学教授 林 叡

論文内容要旨

序 論

マンガング塊採鉱システムにおいて、海面上の採鉱船と海底の自走式集鉱機を連結する経路となる長さ約5000mの細長い、長大な揚鉱管が使用される。激しい海上気象の変化、および、高水深、磨耗、腐食など過酷な使用条件を考慮すれば、システムの設計基準および安全作業条件を得るために、風、波浪、海流などの影響を受けるこの揚鉱管の挙動を是非とも解明する必要がある。

揚鉱管は集鉱と同時に水平方向に海中を移動させられるので、大きな静的変形のほか、波浪、海流などによる流体力や、船体の動揺による強制力により、複雑な横振動を起こすことが考えられる。船体の上下運動のため、揚鉱管の下端において船体の振幅が数倍に増幅されるばかりでなく、係数励振振動も起こし、揚鉱管の運動が不安定になる。また、作業中、揚鉱管の内部は常に鉱液が流れているので、それに伴う揚鉱管の動的安定性の解明も必要であろう。さらに、カルマン渦の放出による揚鉱管の横振動や、採鉱船の曳航速度の変化に伴う揚鉱管の過渡応答など様々な問題がある。

揚鉱管の静的および動的挙動に関しては、これまで幾つかの研究がなされているが、以下の点でまだ不十分なように思われる。まず、揚鉱管の静的挙動に関しては、これまでの研究はすべて揚鉱管の変形の非線形性を考慮しているため、解析が複雑になり、計算時間も非常に長くなっている。採鉱船の曳航速度が大きいときは、揚鉱管の定常相対変位が大きくなり、当然揚鉱管の変形の非線形性を考慮しなければならない。しかし、通常の作業状態では、曳航速度が比較的小さいので、線形近

似が考えられるであろう。次に、揚鉤管の動力学的挙動に関しては、これまで、採鉤船の曳航速度の変化に伴う揚鉤管の過渡応答についてかなり研究されているが、内部流体の流れに伴う揚鉤管の安定性や不安定発生後の揚鉤管の定常振動、および、採鉤船の上下運動による揚鉤管の係数励振振動問題に関する研究がほとんど見当たらない。なお、揚鉤管の動力学的挙動を解析する際に、揚鉤管の自由

横振動の固有振動数や固有モードが必要であるが、有限要素法などの数値解法を使用すれば、数値減衰 (Numerical damping) が起こり、高次の固有モードが正確に求められないため、理論解析により、それらを求める必要があるであろう。

以上の観点に基づいて、本研究では、線形理論による揚鉤管の静的定常応答解析、および、内部流体の流れに伴う揚鉤管の動力学的挙動と船体の上下運動による揚鉤管の係数励振振動の解明に重点を置き、エアリフト方式に使用される下端にバッファをもつ段付き揚鉤管の静的および動的挙動を解析した。

第 1 章 揚鉤管の静的挙動

本章においては、エアリフト方式として使われる下端にバッファをもつ二段からなる段付き揚鉤管について、採鉤船が一定の速度で曳航した場合の揚鉤管の定常応答を、境界層を考慮した摂動法を用いて解析し、揚鉤管の定常相対変位、曲げモーメントなどに及ぼす船の曳航速度と、バッファの質量、寸法、形状などの影響を明らかにした。さらに、揚鉤管の変形の幾何学的非線形性の影響を調べるために、Newton 法を用いて解析し、得られた結果を線形解析による結果と比較検討した。その結果、通常の作業状態では、揚鉤管の静的挙動に及ぼす揚鉤管の変形の幾何学的非線形性の影響が小さく、線形解析でも、工学上良い精度を与えることと、線形解析では、境界層を考慮した摂動法を用いれば、容易に揚鉤管の定常相対変位や曲げモーメントを求められることが明らかにされた。さらに、採鉤船の相対速度の増大に伴い、揚鉤管の定常相対変位が大きくなり、曲げモーメントも全般的に大きくなること、および、バッファの質量が大きいほど、または、バッファの面積が小さいほど、揚鉤管の定常相対変位が小さいことが明らかになった。しかしながら、ほかの条件が一定であれば、バッファのアスペクト比の影響は小さいことがわかった。

第 2 章 揚鉤管の自由横振動

本章では、下端にバッファをもつ二段からなる段付き揚鉤管の自由横振動問題を、境界層を考慮した摂動法を用いて解析し、その固有振動数と固有モードの解析方法を提示するとともに、それらに及ぼすバッファの質量、寸法、形状などの影響を詳細に調べた。その結果、境界層を考慮した摂動法を用いることにより、揚鉤管の自由横振動の固有値問題は容易に解析でき、有限要素法などの数値解法では求めがたい高次の固有モードも単純に求められることがわかった。さらに、揚鉤管の固有振動数は、バッファの質量比とともに大きくなり、バッファの面積比とともに小さくなること、および、ほかの条件を一定として、バッファの質量比、または、バッファの面積比を変化させれば、高次の固有モードに、軸方向の力を受けなかったり、一定の軸方向の力を受けたりするはりに見ら

れない特徴が現れることがわかった。しかしながら、計算結果では、揚鉤管の固有振動数や固有モードに及ぼすバッファのアスペクト比の影響は小さいことが明らかにされた。

第3章 内部鉤液の流れに伴う揚鉤管の安定性とその定常振動

本章では、内部流体が流れているときの揚鉤管の横振動の安定性と不安定発生後の揚鉤管の定常振動を解析した。解析方法として、揚鉤管の横振動の運動方程式に、前章で求めた揚鉤管の自由横振動の固有モードを用いて Galerkin 法を適用した後、得られた内部鉤液が流れている場合の固有値問題を解析して、揚鉤管の横振動の安定判別を行なった。また、周囲の海水の非線形抗力を考慮して、Krylov-Bogoliubov-Mitropolsky の方法を用いて解析し、不安定発生後の揚鉤管の定常振動の振幅と振動数を決定した。さらに、Runge-Kutta-Gill 法を用いて数値解析を行い、得られた結果を理論解析の結果と比較検討して、理論解析の妥当性について検討した。なお、数値計算では、内部流体の臨界流速や不安定発生後の定常振動に及ぼすバッファの質量、寸法、形状などの影響を明らかにした。その結果、揚鉤管の横振動が不安定となる内部流体の臨界流速は、採鉤船の相対速度とともに大きくなり、内部流体の質量比とともに小さくなることと、他の条件が一定であれば、バッファの質量比が大きいほど、面積が小さいほど、または、アスペクト比が大きいほど、内部流体の臨界流速が大きいことがわかった。さらに、K.B.M. 法で二次近似により求めた揚鉤管の不安定発生後の定常振動の振幅や振動数は、数値解法で求めた結果と非常によく一致していること、および、K.B.M. 法の一次近似と二次近似との間の差は小さく、一次近似でも、工学上十分良い精度を与えることが明らかにされた。

第4章 採鉤船の上下運動に伴う揚鉤管の縦振動

本章では、下端にバッファをもつ二段からなる段付き揚鉤管の自由縦振動、および、採鉤船の上下運動による定常縦振動を理論的に解析し、揚鉤管の自由縦振動の固有振動数、固有モード、および、定常振動の振幅などを求めた。その結果、揚鉤管の自由縦振動の固有振動数はバッファの質量比とともにわずかに減少し、バッファのアスペクト比とともに大きくなることがわかった。また、他の条件が一定であれば、バッファの質量比が大きいほど、または、バッファのアスペクト比が大きいほど、バッファにおける共振時での揚鉤管の振幅は大きく、その値は、バッファにおいて、揚鉤管の上端の強制変位の振幅の10倍前後にも達することと、揚鉤管の上、下端の変位の位相差は、共振振動数において $\pm 90^\circ$ になるが、それ以外のところでは、その絶対値が急激に小さくなり、 0° に近い値となることが明らかになった。

第5章 採鉤船の上下運動に伴う揚鉤管の係数励振

本章では、採鉤船の上下運動による揚鉤管の係数励振問題を、揚鉤管の縦振動とモード間の連成の影響を考慮して解析した。解析方法として、第2章で求めた揚鉤管の自由横振動の固有モードを用いて、揚鉤管の運動方程式に Galerkin 法を適用した後、得られた非線形の係数励振系を調和バ

ランス法を用いて解析し、主不安定領域における揚鉤管の定常振動を決定した。また、解析においては、採鉤船の相対速度の影響を考慮して、その値が零か否かによって、揚鉤管の振動が係数励振振動か、または、強制振動と係数励振振動との結合振動となることを明らかにした。その結果、揚鉤管の係数励振振動は、揚鉤管の縦振動を考えた場合、振幅が大きくなるほか、励振領域も秘録なると、モード間の連成の影響も重要で、それを無視できないことが明らかにされた。さらに、採鉤船の相対速度の増大に伴い、係数励振振動の部分が次第に弱まり、やがてカットオフされることがわかった。なお、揚鉤管の上端の強制変位の振幅が比較的大きい場合は、ジャンプ現象が起こること、および、カットオフ直後、係数励振振動の部分がない上に、強制振動の部分も非常に小さく、揚鉤管は比較的安定していることから明らかにされた。

結 論

揚鉤管の設計基準および安全作業条件を得るための基礎資料を提示することを目的として、揚鉤管の静的および動的挙動に関する理論的研究を行い、得られた結果を要約すると次のようになる。

- (1) 通常の作業状態では、揚鉤管の静的定常応答に及ぼす揚鉤管の変形の幾何学的非線形性の影響が小さく、線形解析でも工学上良い精度を与える。また、線形解析では、境界層を考慮した摂動法を用いれば、容易に揚鉤管の定常相対変位や曲げモーメントなどを求めることができる。
- (2) 境界層を考慮した摂動法を用いれば、揚鉤管の自由横振動の固有値問題を解析でき、有限要素法などの数値解法では求めがたい高次の固有モードも単純に求められる。
- (3) 揚鉤管が不安定となる内部流体の臨界流速が採鉤船の相対速度とともに大きくなり、内部流体の質量比とともに小さくなる。また、不安定発生後の揚鉤管の定常振動は K.B.M. 法により解析できる。
- (4) バッファの質量比が大きいほど、または、アスペクト比が大きいほど、共振時での揚鉤管の縦振動の振幅が大きい。その値はバッファにおいて採鉤船の上下運動の振幅の10倍前後にもなる。
- (5) 採鉤船の上下運動は揚鉤管に係数励振を起こし、採鉤船と海流との相対速度が零か否かによって、揚鉤管の振動が係数励振振動か、強制振動と係数励振振動との結合振動になる。また、係数励振を解析する際、揚鉤管の縦振動とモード間の連成の影響を無視できない。

審 査 結 果 の 要 旨

マンガン団塊採鉱システムにおいて、海面上の採鉱船と海底の自走式集鉱機を結ぶ長大な揚鉱管が使用される。厳しい海上気象の変化、および、高水深、海流、波浪など過酷な使用条件を考慮すれば、システムの設計基準および安全作業条件を得るために、この揚鉱管の挙動を是非とも解明する必要がある。

本論文は、このような観点に基づき、揚鉱管の静的定常応答と、揚鉱管の自由横振動、内部鉱液の流れに伴う揚鉱管の動的挙動、および、採鉱船の上下運動による揚鉱管の縦振動と係数励振振動などに関する研究成果をまとめたもので、全編が5章からなる。

まず、第1章では、揚鉱管の定常応答を、境界層を考慮した摂動法を適用して線形解析し、揚鉱管の定常相対変位、曲げモーメントなどを求めた。さらに、揚鉱管の変形の非線形性を考慮して、Newton法を用いて解析し、得られた結果を線形解析による結果と比較検討した。

次に、第2章では、揚鉱管の自由横振動の固有値問題を、境界層を考慮した摂動法を用いて解析し、揚鉱管の固有振動数および固有モードの解析方法を提示した。

第3章では、第2章で求めた揚鉱管の自由横振動の固有モードを用いて、揚鉱管の運動方程式にGalerkin法を適用した後、得られた内部鉱液が流れた場合の固有値問題を解析して、揚鉱管の横振動の安定判別を行った。さらに、周囲の海水の非線形抗力を考慮して、K.B.M.法を適用して不安定発生後の揚鉱管の定常振動を解析した。

また、第4章では、揚鉱管の自由縦振動を解析して、その固定振動数を固有モードを求めた後、採鉱船の上下運動に伴う揚鉱管の定常縦振動を解析した。

最後に、第5章では、揚鉱管の縦振動とモード間の連成の影響を考慮して、揚鉱管の係数励振振動問題を定式化し、調和バランス法を用いて主不安定領域における揚鉱管の定常振動を解析した。

以上要するに本論文は、揚鉱管の静的挙動および自由横振動の固有値問題について新しい解析方法を提案するとともに、揚鉱管の動的安定性や非線形振動などの動的特性に関する多くの有用な知見を与えたものであり、機械工学ならびに海洋工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。