

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	剛体球及び剛体円筒と半無限弾性体間の凝着転がり接触の解析モデルとその解析解
Title(English)	
著者(和文)	井口洋二
Author(English)	Yoji Iguchi
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11404号, 授与年月日:2020年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:高橋 邦夫,齊藤 滋規,井上 裕嗣,佐藤 千明,秋田 大輔
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11404号, Conferred date:2020/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

論文要旨

THESIS SUMMARY

専攻： Department of	国際開発工学	専攻	申請学位 (専攻分野)： Academic Degree Requested	博士 Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	井口 洋二		指導教員 (主)： Academic Supervisor(main)	高橋 邦夫	
			指導教員 (副)： Academic Supervisor (sub)		

要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

剛体球および剛体円筒と半無限弾性体間の凝着転がり接触に関して解析モデルを提案した。剛体球面及び剛体円筒面は Hertz 接触理論と同様に 2 次曲面で近似しており、半無限弾性体は完全弾性体とした。弾性変形は無限遠方において収束し、球面接触は垂直変位制御、円筒面接触問題は垂直荷重制御及び平面ひずみ状態下における定式化を行った。

凝着転がり接触は 3 種の弾性変形を用いて表現されており、それぞれ、球面/円筒面、平面、傾斜面状の弾性変形である。特に傾斜面状の弾性変形は接触面に純モーメントと同時に剛体面の回転変形を与える本論において最も重要な点の一つである。また、これらの弾性変形と接触面内の圧力分布は古典接触論における圧力と弾性変形の間を満たしており、力学的に矛盾せず物体の転がりや脱離を表現出来る。

接触状態は系全体のエネルギー平衡条件によって決定した。系全体のエネルギーは半無限弾性体に充填される弾性エネルギー、接触前後の表面、界面自由エネルギーの差である界面エネルギー、メカニカルポテンシャルエネルギーの和で表した。なお、メカニカルポテンシャルエネルギーは荷重制御下である円筒面接触問題のみで用いた。

エネルギー平衡条件のみで接触状態を決定する場合、幾何的に矛盾する解が得られる場合がある。回転角を増大させていくと、剛体面が半無限弾性体面に貫入するような解が得られる。このような解が得られる場合は、現実においては回転方向に接触面が増大せざるを得ない。しかし、同時にエネルギー平衡条件は成り立っているため、接触面、弾性変形形状及び剛体面の垂直変位は維持される。すなわち、剛体面が接触面を維持しながら回転方向に並進、静的な転がりが発生する。また、エネルギー平衡条件そのものが成り立たない、つまりエネルギー平衡点が存在しない場合は接触していない方がエネルギー的に安定になり、剛体面の弾性体面からの脱離が発生する。これらを接触の安定性として議論することで、球及び円筒の転がり、脱離条件を導いた。転がり条件は 2 物体の接触面外における幾何的な干渉条件を考慮することで、脱離条件は系全体のエネルギー平衡点の有無を議論することで導くことができた。幾何的な干渉条件は接触面外における弾性変形を考慮する必要があるが、既存研究においては球面/円筒面及び平面の接触問題にしか解が与えられていなかったため、新たに剛体傾斜面と半無限弾性体間の凝着接触を解析的に解いた。剛体傾斜面の接触問題に関しては、球面/円筒面及び平面の接触問題と異なる非軸対称問題であり、かつ接触端部の圧力が無限大に発散する特異点問題が発生する。そこで、円形接触面内部の圧力点と弾性変形の観測点のそれぞれを 2 つの極座標で表現する特殊な座標系を用いることでこれらの問題を解決した。剛体傾斜面の接触時、接触端部において圧力が無限大に発散するため、弾性変形も凝着接触に見られる特徴的な切り立った変形になる。しかし、特定の垂直変位量

及び観測方向において、圧力が消失し、凝着接触の特徴も消失することが分かった。

また、接触半径に対するフォースカーブから、最大凝着力を導いた。以上の議論により、接触半径、荷重、モーメントなどの凝着転がり接触を表現するすべてのパラメータに対して解析解を導くことが出来た。

これらの解析解を元に転がり時の弾性変形及び圧力分布、無回転から転がり時及び無荷重時から脱離時のエネルギーカーブ上の振る舞い、転がりに必要なトルク、回転角について考察を行った。凝着接触においては、平面状の垂直変位の影響で接触端部において圧力が無限大に発散し、弾性変形も特徴的な形になる。しかし、転がり時の弾性変形及び圧力分布を調べた結果、接触前縁部（転がり方向に対して）において、圧力が消失すると同時に特徴的な変形が無くなり、剛体表面に沿うような変形をすることが明らかとなり、剛体傾斜面の接触と同様の傾向であることがわかった。エネルギー平衡条件と転がり条件から、それぞれ転がり時のエネルギー閾値を導くことが出来、エネルギーカーブ上でエネルギー平衡条件および転がり条件を視覚的に確認することが出来た。また、脱離時の条件もエネルギーカーブ上でエネルギー平衡点が消失することを確認出来た。転がりに必要なトルクは荷重と共に増加し、逆に転がりに必要な回転角は荷重と共に減少することがわかった。これによって、ベアリングや LM ガイドなどの転動体を含む機械要素において、予圧及び予荷重が駆動トルクを増加させると同時に回転・並進方向のガタが減少し精度が向上する解析的な説明を与えることに成功した。

これらの考察を基に、接触状態を視覚的に表現した図，“接触状態図”を提案した。“接触状態図”は任意の荷重、回転角に対して物体がどのような接触状態にあるのかを表す。解析解を用いて任意の条件に対してこの図を描画することで、球体及び円筒体をどのような条件で脱離させられるのか、また、転がるのかについて視覚的に確認することが出来る。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

(博士課程)
Doctoral Program

論文要旨

THESIS SUMMARY

専攻： 国際開発工学 専攻
Department of
学生氏名： 井口 洋二
Student's Name

申請学位 (専攻分野)： 博士 (工学)
Academic Degree Requested Doctor of
指導教員 (主)： 高橋 邦夫
Academic Supervisor(main)
指導教員 (副)：
Academic Supervisor(sub)

要旨 (英文 300 語程度)
Thesis Summary (approx.300 English Words)

An analytical model of a rolling adhesional contact between a rigid sphere/cylinder, and an elastic half space is proposed. The spherical and the cylindrical problems are solved under normal displacement, and normal force controls, respectively. The rolling adhesional contact is described by three types of elastic deformations: spherical/cylindrical, flat, and inclined. The spherical/cylindrical elastic deformations are assumed as the parabolic surface in the same manner as the Hertz theory. The contact condition is determined by the energy equilibrium of the system. The total energy of the system is the sum of elastic, interfacial, and mechanical potential energies. the mechanical potential is only applied to cylindrical problem because of force control. The contact stabilities can be considered by the interference between the two bodies, and the existence of the energy equilibrium point, which determine rolling and detachment conditions, respectively. In spherical problem, the maximum adhesion force can be calculated from the shape of the force curve. On the other hand, in cylindrical problem, the value of the maximum adhesion force is equivalent to the detachment force. From these considerations, the analytical solution of the rolling adhesional contact is analytically formulated. Under the condition of the adhesional contact, the pressure and the elastic deformation have the singularities at the contact edge. However, at the beginning of the rolling, it is found that these singularities vanish at the contact edge toward the rolling direction. The rolling and detachment conditions are described by the energy curves, and the energy equilibrium, rolling, detachment conditions are graphically confirmed from plotting the energy curves. The torque required to roll increases with the applied load, but the rotational angle required to roll decreases with the applied load. Finally, I propose the diagram of the contact stability, which can graphically confirm the rolling and detachment conditions by the applied load and the rotational angle.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note: Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。
Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).