

学 位 論 文 題 名

不連続な壁体構造を有するコンクリートステイブサイロの 地震時挙動に関する研究

学位論文内容の要旨

食糧・酪農飼料及び鉱物資源の海外依存度が極めて高い我が国では、穀物や石炭などの大量貯蔵を目的とした大規模な鉄筋コンクリート製サイロあるいは鋼板製サイロが数多く利用されており、備蓄規模の拡大に応じてますます大型化の傾向を見せている。この種のサイロ構造物は内容物として大量の粉粒体を貯蔵しているため、壁面に作用する静的圧力、内容物投入時の衝撃圧、排出時の流動現象や動的過大圧力のほか、地震時におけるサイロ壁体構造と内容物の動的相互作用など、通常の土木・建築構造物には見られない特殊な問題を抱えている。

サイロ構造物としては種々の構造材料や構造形式のものが利用されているが、欧米では70年来の使用実績を持つコンクリートステイブサイロ（concrete stave silo）が工業用・農業用大型貯蔵施設として広く普及している。このステイブサイロは、工場で大量に成型されたコンクリートブロック（ステイブ）を用いて、現場作業の簡易化・工期短縮をはかった経済的で施工性に優れたサイロであり、欧米各国では設計施工規準も制定されている。しかし、千数百個にも及ぶステイブを円筒状に組合せて積上げ、外壁をリング状の鉄筋（フープ）で締付けるという不連続な壁体構造であるため、特に地震多発地帯である我が国では、その地震時挙動および耐震安全性に関する検討が望まれている。

本研究は、不連続な壁体構造を有するコンクリートステイブサイロの振動特性、地震応答特性および内容物や不連続構造の影響を実験的に解明するとともに、不連続性を考慮した動的解析モデルを開発して地震時挙動に関する数値シミュレーションを実施し、さらに、サイロ構造物の耐震設計に有用な内容物の有効質量係数等の検討を行なったものである。本論文は全6章から構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第1章は序論であり、サイロ構造物に関する既往の研究を概括し、本研究の目的と内容を要約している。

第2章では、コンクリートステイブサイロの基本的振動特性および地震応答特性、さらには内

容物の有無や物性の相違による影響を把握するために、水平振動台による模型振動実験を実施した。模型用ステイブサイロは幾何学的縮尺 $1/6$ 、壁体高さと直径の比 2.0 で、内容物は粒状体である「玄米」および粉状体として表面を湿らせた「オガクズ」の2種類を使用した。まず、模型頂部における加速度共振曲線の比較から、模型用ステイブサイロの基本的振動特性は内容物の有無で極端に変化することが明らかになった。一般的に、内容物の存在は応答倍率を減少させ、共振振動数を低下させる。しかし、粒状体である玄米と粉状体であるオガクズとでは、内容物としての質量・剛性・減衰効果に顕著な相違が見られた。また、地震波応答時の内容物の動的挙動に関して、玄米は壁体構造とほぼ一体となった応答性状を示すが、粉状体であるオガクズの場合は壁体構造と全く異なった挙動を示すことが判明した。なお、模型状態によらず、さらには入力加速度レベルを増大させても、壁体上部・中央部のステイブには動ひずみが殆ど生じないという、壁体構造の不連続性に起因するステイブサイロに特徴的な実験結果も明らかになった。

第3章では、小型ステイブサイロ壁体構造模型を用いた静的水平加力実験、地震波加振実験および1質点履歴復元力モデルによる非線形地震応答解析から、不連続な壁体構造を有するコンクリートステイブサイロの復元力特性について検討を行なった。まず、正負交番漸増荷重を模型頂部に加えた静的水平加力実験結果によると、ステイブサイロの壁体構造は壁体材料の降伏以前の段階から、骨格曲線が軟化バネ型である顕著な履歴復元力特性を示すことが明らかになった。また、地震波応答時においても、応答振幅の増加に伴って履歴ループの面積が増大し、剛性勾配が低下する傾向を持った履歴復元力性状を描き、非線形な地震応答特性を示すことが判明した。さらには、解析モデルの動的復元力特性に模型実験で得られた静的復元力特性が適用出来ることから、ステイブサイロ壁体構造の履歴復元力特性は、それほど速度依存性がないことも明らかになった。

第4章では、相似則を考慮した縮尺 $1/8$ 模型用ステイブサイロおよび内容物としては実物の「米」を用いて、正弦波・地震波加振実験を行なった。また、このサイロ模型と同一材料・同一寸法の円筒シェル模型による同様な振動実験を実施し、不連続構造の影響を検討した。まず、両模型の共振振動数の比較から、ステイブ継目の存在によるステイブサイロ壁体構造の剛性低下傾向が顕著に示された。また、地震波加振実験における入力地震波の卓越振動数と模型用ステイブサイロの共振振動数との相互関係がより重要であり、内容物の減衰効果で応答倍率は必ず減少するとは断定出来ない結果も得られた。さらには、ステイブサイロ壁体構造の履歴復元力特性に起因して、入力加速度レベルの増大に伴って応答倍率が漸次減少し、応答加速度の卓越振動数が順次低下するという非線形な地震応答特性を示すことが明らかになった。

第5章では、コンクリートステイブサイロの動的挙動に関する解析的な検討をめざして、ステイブサイロ要素、と名付けた新しい動的解析モデルを開発した。ステイブサイロ壁体構造の主要な構成要素であるステイブ、フープおよびステイブ継目をそれぞれ「剛体」、「フープバネ」、「剛体間バネ」でモデル化し、これら3種類の基本解析モデルから組立てられる円筒状の「剛体－剛体間バネ－フープバネ」系モデルを、さらに2つの水平面で切断して取出した構造要素がステイブサイロ要素である。また、この構造要素を実際に使用する上で最も重要な問題となる剛体間バネ剛性の評価方法を提案した。すなわち、解析すべきステイブサイロ壁体構造と同一材料・同一寸法の円筒殻を考え、その円筒殻と等価な剛性定数をひとつの規準値とし、さらにサイロ模型実験結果に基づいて壁体構造の不連続性に起因する構造剛性の低減率を推定するものである。これらの「ステイブサイロ要素」および「剛体間バネ剛性の評価方法」を地震時挙動の数値シミュレーションに適用し、前章で述べた縮尺1/8模型用ステイブサイロの地震波加振実験結果と比較検討することにより、本解析手法の妥当性が検証されると共に、等価線形化した地震応答解析の適用可能範囲が明らかになった。さらには、内容物を壁体構造の「付加質量」と見なす簡便なモデル化による地震応答解析とステイブサイロ模型実験結果との比較を通じて、サイロ構造物の耐震設計において重要な「地震応答時の内容物の有効質量係数」の算定が可能となった。

第6章では、以上の各章で得られた主な結論を要約し、本論文の総括を行なった。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 芳 村 仁

副 査 教 授 藤 田 嘉 夫

副 査 教 授 角 田 與史雄

副 査 教 授 柴 田 拓 二

本論文は、不連続な壁体構造を有するコンクリートステイブサイロの振動特性、地震応答特性および内容物や不連続構造の影響を実験的に解明するとともに、不連続性を考慮した動的解析モデルとその剛性評価法を新たに開発し、ステイブサイロの地震時挙動に関する数値シミュレーションへの適用性・解析精度の検証を行なったものであり、全6章から構成されている。

第1章は序論であり、一般的なサイロ構造物に関する動的問題の概要と既往の研究について述

べるとともに、本研究の目的と内容を要約している。

第2章では、縮尺1／6 模型用ステイブサイロおよび内容物として「玄米」、「オガクズ」を用いた模型振動実験を実施し、コンクリートステイブサイロの基本的振動特性・地震応答特性と内容物の動的効果に関する検討を行なっている。内容物の存在はステイブサイロの応答倍率を減少させ、その共振振動数を低下させるが、粒状体である玄米と粉状体であるオガクズとでは、内容物としての質量・剛性・減衰効果に顕著な相違が見られることを示している。また、地震波応答時における内容物とサイロ壁体構造との動的相互作用は、内容物の物性に依拠して全く異なった挙動を示すことを明らかにしている。

第3章では、小型ステイブサイロ壁体構造模型を用いた静的水平加力実験、地震波加振実験および1 質点履歴復元力モデルによる非線形地震応答解析を通じて、コンクリートステイブサイロ壁体構造の復元力特性に関する検討を行なっている。静的水平加力実験から、ステイブサイロの壁体構造は壁体材料の降伏以前の段階から骨格曲線が軟化バネ型である顕著な履歴復元力特性を示すことが判明し、さらに履歴復元力モデルの動的特性に模型実験で求めた静的復元力曲線が適用できることから、ステイブサイロ壁体構造の履歴復元力特性は速度依存性が少ないことを明らかにしている。

第4章では、相似則を考慮した縮尺1／8 模型用ステイブサイロおよび内容物として「米」を用いた正弦波・地震波加振実験を行なうとともに、さらにこのサイロ模型と同一材料・同一寸法の円筒シェル模型による同様な振動実験を実施し、不連続構造の影響を検討している。両模型の共振振動数の比較結果から、ステイブ継目の存在によるステイブサイロ壁体構造の剛性低下傾向を説明している。また、ステイブサイロ壁体構造の履歴復元力特性に起因して、入力加速度レベルの増大に伴って応答倍率が漸次減少し、応答加速度の卓越振動数が順次低下するという非線形な地震応答特性を示すことを明らかにしている。

第5章では、コンクリートステイブサイロの地震時挙動に関する解析的な検討をめざして、新しい動的解析モデルとその剛性評価法の開発を行なっている。まず、ステイブサイロ壁体構造の主要な構成要素であるステイブ、フープおよびステイブ継目をそれぞれ剛体、フープバネ、剛体間バネでモデル化し、これら3 種類の基本解析モデルから組立てられる円筒状の剛体－剛体間バネ－フープバネ系モデルに基づいて、ステイブサイロ要素が考案されている。また、この構造要素における剛体間バネ剛性の評価法は、解析すべきステイブサイロ壁体構造と同一材料・同一寸法である円筒殻と等価な剛性定数をひとつの規準値とし、さらにサイロ模型実験結果に基づいて、壁体構造の不連続性に起因する剛性低減率を推定するものである。次に、これらステイブサイロ

要素および剛体間バネ剛性の評価法を地震時挙動の数値シミュレーションに適用し、縮尺 1/8 模型用ステイブサイロの地震波加振実験結果との比較検討により、本解析手法の妥当性を検証するとともに、等価線形化した地震応答解析の精度を明らかにしている。さらに、内容物を壁体構造の付加質量と見なす簡便な解析モデル化による地震応答解析結果およびステイブサイロ模型実験結果との比較を通じて、サイロ構造物の耐震設計において最も重要な地震応答時における内容物の有効質量係数の算定が可能となることを示している。

第 6 章では、以上の各章で得られた主な結論を要約し、本論文の総括を行なっている。

これを要するに、本論文は不連続な壁体構造を有するコンクリートステイブサイロの地震時挙動に関して実験的に多くの新知見を与えると同時に、地震応答特性および内容物の有効質量係数に関する数値シミュレーションを可能とする新たな解析手法を提案したものであり、構造動力学の進展に寄与するところ大なるものがある。よって、著者は博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。