

I-314

ステイブ・サイロ壁体構造の一動的解析モデルとその剛性定数について

北海道大学工学部 正会員 佐々木 康彦
 北海道大学工学部 正会員 芳村 仁
 日本建設コンサルタント(株) 正会員 熊谷 健一

1. まえがき

“ステイブ・サイロ (stave silo)” とはコンクリートブロック(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)で締付けた不連続な壁体構造を持つサイロ構造物である。著者等は現在までに各種模型振動実験を実施し、この様なサイロ構造物の振動特性・地震時挙動と不連続性や内容物の影響に関する検討を進めてきた。本報告は、さらにステイブ・サイロ壁体構造の動的挙動に関する解析的な検討をめざした、固有振動解析のための一解析モデルの概要とその剛性定数の算定法について述べたものである。

2. 剛体-剛体間バネ-円弧梁(RSB)系モデル

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、フープ及びステイブ継目の挙動を次のようにモデル化する。個々のステイブは歪が殆ど生じないという実験結果に基づいて、直方体状の『剛体』と仮定する。リング状のフープはステイブとの接触点を節点とする、軸方向変形を考慮した『円弧梁』と考える。また、ステイブ継目での凹凸や摩擦による抵抗機構を、ここでは、剛体間に配置した『分布バネ・集中バネ』のバネ剛性としてモデル化する。これら三種類の構造モデルで構成される“剛体-剛体間バネ-円弧梁”系モデル(以下、RSB系モデルと略称する)の基本型を図1に示す。

次に、円周方向 N 個、高さ方向 M 段に剛体を積上げ、それら剛体の外面全周に渡って円弧梁を配置した『円筒状RSB系モデル』を考える。一般に三次元運動の剛体は6自由度を持つが、ここでは図1に示した4個の支配的変位・回転成分を未知量とする。すなわち、剛体重心位置での円周方向・半径方向変位 v_g, w_g 及び2つの回転角 θ_g, ϕ_g である。まず、円弧梁や剛体間バネの質量は剛体の質量に比べて十分無視出来る。従って、この円筒状RSB系モデルの全体質量マトリックス $[M_G]$ ($4NM \times 4NM$)は、系全体の重心変位ベクトル $\{\delta_g\}$ の各成分に対応した剛体の質量あるいは慣性モーメントを対角成分とする対角マトリックスとなる。また、全体剛性マトリックス $[K_G]$ ($4NM \times 4NM$)は、 $[K_G] = ([K_S] + [K_H])$ で得られる。剛体間分布バネ・集中バネのバネ剛性成分 $[K_S]$ と円弧梁の曲げ剛性・伸び剛性成分 $[K_H]$ である。これらは剛体間バネ・円弧梁の各剛性定数や円弧梁・剛体寸法のほか、隣接剛体間の運動学的関係に基づいて定式化される¹⁾。

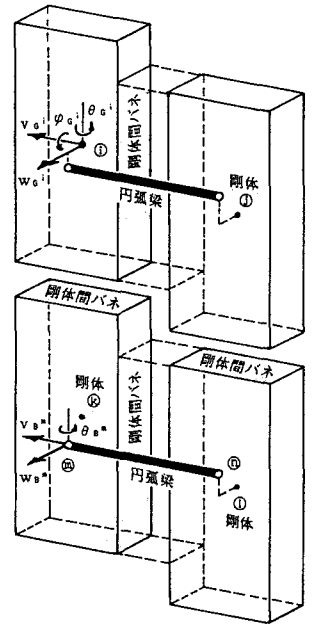


図1 基本的RSB系モデル

3. ステイブ・サイロ要素と構造特性マトリックスの定式化

ステイブ・サイロ壁体構造に円筒状RSB系モデルをそのまま適用しても、原則的には固有振動解析が可能である。しかし、実際には数千自由度にも及ぶ大次元固有値問題となり、実用的な解析モデルとは言えない。そこで、前述の円筒状RSB系モデルを基礎にしながら、次のような解析モデルを考案した。

円周方向 N 個の剛体で構成される円筒状RSB系モデルから、2つの水平面で切断して取出した“構造要素”を図2に示す。この構造要素の両境界面上で、各剛体の切断面の中心点を連ねた円形曲線をそれぞれ

節線①、①と呼び、図に示した4個の変位・回転成分を節点変位とする。さらに、これらの節線変位は円周方向に $\cos n\psi$ あるいは $\sin n\psi$ 分布形（ n は円周方向波数、 ψ は円周方向座標）をなすとし、その振幅を表わす節線変位振幅ベクトル $\{\delta_N^E\}$ を構造要素の未知量とする。ここで、2つの水平切断面内のRSB系モデルを考え、領域内の剛体の重心変位ベクトルを $\{\delta_G^C\}$ とする。対応するRSB系モデルの質量・剛性マトリックス $[M_G^C]$ 、 $[K_G^C]$ は、この領域に含まれる剛体の質量、剛体間バネ・円弧梁の剛性だけを算定することで得られる。

次に、剛体の重心変位の円周方向分布形にひとつの規定を設ける。すなわち、円周上の任意位置にある剛体の切断面中心点での変位は、同じ点での構造要素の節線変位に等しいとする。この変位分布規定と剛体の運動学的関係に従うと、剛体の重心変位ベクトル $\{\delta_G^C\}$ と節線変位振幅ベクトル $\{\delta_N^E\}$ には $\{\delta_G^C\} = [T_G] \{\delta_N^E\}$ という関係式が成立する。よって、この構造要素の質量・剛性マトリックス $[M_N^E]$ 、 $[K_N^E]$ (8×8) は、 $[M_N^E] = [T_G]^T [M_G^C] [T_G]$ 及び $[K_N^E] = [T_G]^T [K_G^C] [T_G]$ で得られる。ここで、上付添字 T は転置を表わす。以降は、この新しい解析モデルを『ステイブ・サイロ要素』と呼ぶことにする。

4. ステイブ・サイロ要素における剛体間バネの剛性定数の算定法

実物ステイブ・サイロあるいはステイブ・サイロ模型にステイブ・サイロ要素を適用する場合、剛体間導入した分布バネ・集中バネの剛性定数をどのように決定すべきかが、最も重要な問題となる。ここでは、解析すべきステイブ・サイロ壁体構造と同一材料・同一寸法の円筒殻を考え、それと等価な剛性定数をひとつの基準値とし、さらにサイロ模型実験結果に基づいて、ステイブ継目による壁体構造の剛性低減率を推定するものである。

円筒殻と等価な剛性定数の算定式は次のように考える。上下あるいは左右に隣接する剛体の接触面に相対変位・回転角を与えると、剛体間分布バネ・集中バネに力やモーメントが生じる。他方、円筒殻理論における歪・曲率変化を前述の相対変位・回転角で差分近似するとともに、対応する断面力・断面モーメントを剛体接触面での力やモーメントと等しくする。このようにして、剛体間分布バネ・集中バネの基準剛性定数の算定式が得られる¹⁾。

この算定式の妥当性を検証するため、ステイブ・サイロ模型の諸元を用いた二種類の計算モデルで固有振動解析を行った。表1は計算モデル（剛体－剛体間バネ系）及びそれと同一材料・同一寸法の片持ち円筒殻との固有振動数を比較したものである。計算モデルは円弧梁の剛性を零としたステイブ・サイロ要素により、また片持ち円筒殻は軸対称円筒要素でモデル化した。これらの詳細及びステイブ・サイロ壁体構造の剛性低減率の推定値に関しては講演当日に報告したい。

参考文献 1) 佐々木康彦、芳村 仁、熊谷健一：ステイブ・サイロの固有振動解析のための一離散的構造モデル、土木学会北海道支部論文報告集、第45号、pp.145-150、1989。

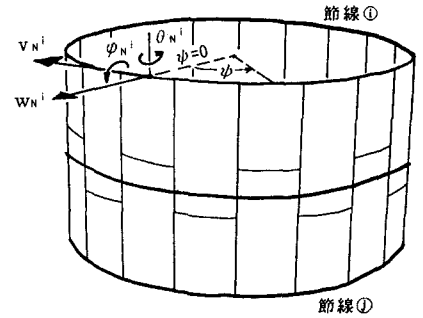


図2 ステイブ・サイロ要素と節線変位

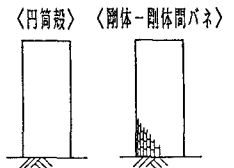


表1 計算モデルと円筒殻の固有振動数 f (Hz) の比較

(a) 縮尺1/8模型の諸元モデル

	円周方向波数 n	高さ方向次数 m		
		1	2	3
円筒殻		215	615	924
剛体－剛体間バネ系 (相対誤差%)	1	210 (-2.3)	587 (-4.6)	835 (-9.6)
円筒殻		148	405	638
剛体－剛体間バネ系 (相対誤差%)	2	145 (-2.0)	398 (-1.7)	610 (-4.4)

(b) 縮尺1/6模型の諸元モデル

	円周方向波数 n	高さ方向次数 m		
		1	2	3
円筒殻		183	513	747
剛体－剛体間バネ系 (相対誤差%)	1	190 (+3.8)	497 (-3.1)	617 (-17.4)
円筒殻		122	340	529
剛体－剛体間バネ系 (相対誤差%)	2	128 (+4.9)	347 (+2.1)	501 (-5.3)