

## I-559

## 内容物を考慮したステイブ・サイロ壁体構造の地震応答解析

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

## 1. まえがき

“コンクリートステイブ・サイロ (concrete 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、粉粒体貯蔵用のサイロ構造物である。このようなステイブ・サイロ壁体構造の地震時挙動に関する数値解析的な検討を目的として、“ステイブ・サイロ要素”と名付けた、新たな動的解析モデルの開発を進めてきた。また、壁体構造の不連続性に起因する剛性低減を考慮した構造剛性の評価方法を提示し、サイロ模型実験結果と比較しながら等価線形化した地震応答解析を行なった<sup>1)</sup>。

本報告はさらに、内容物を充填した状態でのステイブ・サイロの地震時挙動に注目したものである。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全体系の地震応答解析を試みた。また、地震波加振実験結果に基づいて、地震時における内容物の有効質量係数についても検討を加えた。

## 2. 模型用ステイブ・サイロの概要と壁体構造・内容物の解析モデル

地震応答解析の数値計算モデルとした、縮尺1/8模型用ステイブ・サイロを図1に示す。この模型の寸法は直径80cm、高さ198.5cm、壁厚2.0cmで、円周方向50個、高さ方向13段のモルタル製模型用ステイブ (単位体積重量 2.09gf/cm<sup>3</sup>; 幅5.0cm、高さ15.2cm、厚さ2.0cm) を円筒状に組立て、外壁を32組のフープ (4mm径の軟鋼線材) で締付けてある。内容物は「米 (単位容積重量0.70~0.75gf/cm<sup>3</sup>)」を使用し、詰込み深さは模型高さの80%とした。

ステイブ、フープ、ステイブ継目というステイブ・サイロ壁体構造の主要な構成要素を、それぞれ直方体形状の『剛体』、両ステイブの半径方向相対変位に抵抗する『フープバネ』、剛体間に配置した『分布バネ・集中バネ』としてモデル化した。これら三種類の基本解析モデルで構成される円筒状の“剛体-剛体間バネ-フープバネ”系 (円筒状RBH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、図2に示す“ステイブ・サイロ要素”である。この新たな構造要素は切断面における各節線上で、図のような4個の節線変位・回転角を未知量とする。なお、このような円筒状RBH系モデルの“有限要素化”により、解析モデルの簡略化と自由度の大幅な低減が可能となった。

次に、剛体間バネの剛性定数に関する評価方法が必要不可欠である。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、その円筒殻と等価な剛性定数を基準値とし、さらにステイブ・サイロ模型実験結果に基づいて、不連続性に起因する構造剛性の低減率を推定する。ただし紙面の関係から、円筒殻と等価な剛体間バネの剛性定数 (基準値) の算定式の誘導過程、その基準剛性定数の算定式の妥当性と精度の検証結果、そして模型実験結果に基づいた剛性低減率の推定方法については、参考文献1)を参照されたい。

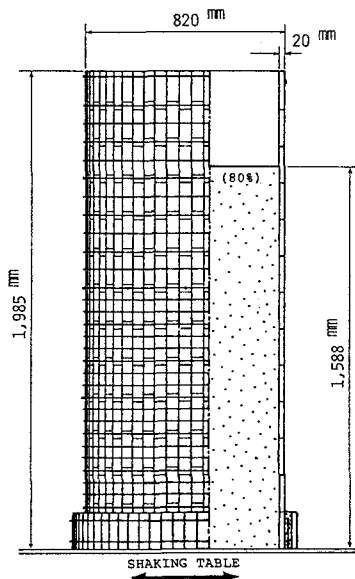


図1 模型用ステイブ・サイロ  
(幾何学的縮尺1/8)

内容物の解析モデルに関して、ここでは簡単のために質量効果だけを考慮し、内容物を壁体構造の付加質量と仮定する。したがって、内容物の付加質量を含むサイロ壁体構造の換算質量密度  $\rho_0$  は、次式で得られる。

$$\rho_0 = \rho_w + C_{eff} \cdot \rho_0 \cdot r \quad (1)$$

ここで、 $\rho_w$ 、 $\rho_0$  はそれぞれ壁体構造と内容物の質量密度、 $r (=V_0/V_w)$  は壁体構造の体積  $V_w$  に対する内容物の容積  $V_0$  の比を表わす。また、 $C_{eff}$  は内容物の有効質量係数と呼ばれ、内容物の全質量に対する付加質量の割合を表わす重要な指標である。なお、このような簡便なモデル化は、内容物が壁体構造と一体化した動的挙動を示す物性条件や、内容物が塑性化・流動化して顕著な減衰効果を示す以前の応答領域では、ほぼ妥当なものと考えられる。

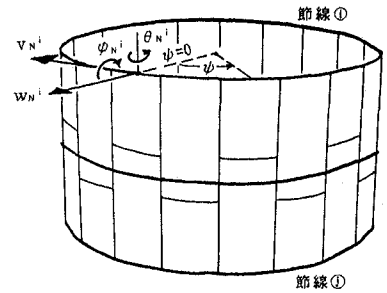


図2 “スティープ・サイロ要素”  
および節線変位

### 3. 縮尺1/8 模型用スティープ・サイロの

#### 地震応答解析と内容物の有効質量係数

一連の地震応答解析で使用した入力地震波形は、根室半島沖地震の北海道厚岸町で得られた加速度記録であり、模型実験の相似則から時間軸は1/8に圧縮してある。また、数値積分は Newmark の  $\beta$  法 ( $\beta=1/4$ ) により、時間間隔を  $\Delta t=0.005$  秒とした。

図3は最大入力加速度レベル0.23gに対する模型頂部での応答加速度の時刻歴波形を、(a) 模型実験と (b) 数値解析とで比較した結果である。この数値解析における2個のパラメタ（剛性低減率  $\alpha=0.024$  / 減衰定数  $h=0.030$ ）は、模型内部が空の状態における同一入力加速度レベルでの設定値を用いた<sup>1)</sup>。また、内容物の有効質量係数は  $C_{eff}=0.80$  である。同図から、簡便な内容物のモデル化にも係わらず、実験結果の応答性状を比較的良く再現できることがわかる。

図4は前述の地震応答解析における内容物の有効質量係数を  $C_{eff}=0.70 \sim 1.00$  の範囲で変化させた場合の、模型用スティープ・サイロの基本固有振動数  $f$  (Hz) および最大応答加速度の実験値に対する比率の推移を示したものである。この検討結果から、最適な内容物の有効質量係数は  $C_{eff}=0.80 \sim 0.85$  であることが特定できる。

#### 参考文献

- 1) 佐々木康彦、芳村 仁：コンクリートスティープサイロの構造不連続性を考慮した動的解析モデルと地震応答解析、構造工学論文集、Vol.37A、pp.883-892、1991。

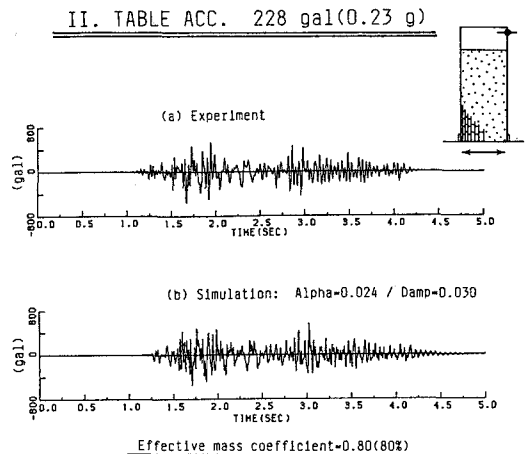


図3 地震応答加速度波形の比較  
[ 根室半島沖地震波 ]

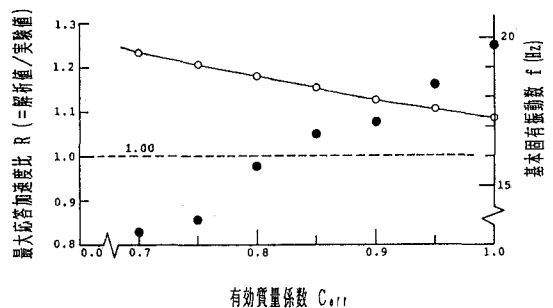


図4 内容物の有効質量係数と  
基本固有振動数・最大加速度応答値