

I-30

壁体構造の不連続性を考慮したステイブ・サイロの等価線形化地震応答解析

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

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 silos)”が、工業用あるいは農業用大型貯蔵施設として広く普及している。このコンクリートステイブサイロは、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構造物であり、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を持つため、特に地震多発地帯である我が国では、その振動特性や地震時挙動について実験的・解析的な検討が望まれている。

このようなステイブ・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”と呼ぶ動的解析モデルの開発を行ない、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てきた^{1), 2)}。本報告は、ステイブ・サイロ要素におけるフープ(円弧梁)の簡略化改良モデルの概要を追記し、さらにステイブ・サイロ模型の地震波加振実験結果との対比に基づいて、等価線形化した地震応答解析結果について述べたものである。

2. ステイブ・サイロ壁体構造の動的解析モデルおよび構造剛性の評価方法の概要

2.1 三種類の基本解析モデル

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』(詳細は後述)、剛体間に配置した『分布バネ・集中バネ』としてモデル化する。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RSH系)モデルにおける全体系の剛性・質量マトリックスは、その基本解析モデルである剛体、剛体間バネ、フープバネの剛性や質量のほか、幾何学的寸法や隣接剛体間の運動学的関係によって定式化が可能となる¹⁾。

2.2 ステイブ・サイロ要素

図1に示す“ステイブ・サイロ要素”は、さらに円筒状RSH系モデルを2つの水平面で切断して取出した構造要素であり、切断面における各節線上で図のような4個の変位・回転成分を節線変位とする。これらの節線変位は円周方向に $\cos n\phi$ あるいは $\sin n\phi$ 分布形(n は円周方向波数、 ϕ は円周方向座標)をなすとし、その節線変位振幅をこの構造要素の未知量とする。このような円筒状RSH系モデルの“有限要素化”により、動的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。

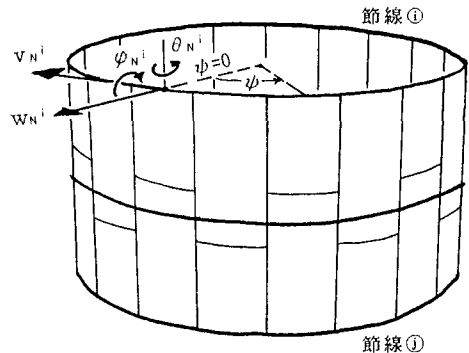


図1 ステイブ・サイロ要素と節線変位

2.3 フープ(円弧梁)の簡易化改良モデル

リング形状のフープは図2のように、ステイブ横幅の中央点で個々のステイブと接触しており、隣接ステイブの中心間隔を一区間とすると、この区間のフープは開き角 β ($=2\pi/N$ 、 N は円周方向のステイブ個数)の“円弧梁”とみなすことができる。さらに、ステイブとフープの接触状態を考慮した上で、フープ(円弧梁)の力学的作用を簡略化するため、隣接ステイブの半径方向相対変位に抵抗する“フープバネ”にモデル化する(図2参照)。

このようなフープバネのバネ定数は、円弧梁の曲げ剛性・伸び剛性と等価なバネ定数として、その算定式を解析的に求めることができる。すなわち、円弧梁のある節点に半径方向節点力を加えた場合の、その節点での半径方向変位を求め、この半径方向剛性とフープバネのバネ定数とを等しいとする。

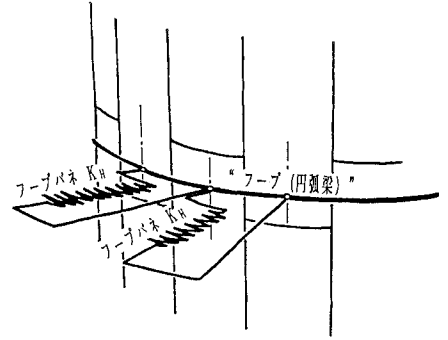


図2 フープ(円弧梁)とフープバネ

2.4 ステイブ・サイロ要素における剛体間バネ剛性の評価方法

前々節で述べたステイブ・サイロ要素をステイブ・サイロ模型あるいは実物ステイブ・サイロに適用する場合、ステイブ継目での凹凸や摩擦による抵抗機構をモデル化した“剛体間分布バネ・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。

本研究では、剛体間バネの剛性定数に関するひとつの評価方法を提示した。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ものである。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2)を参照されたい。

3. 縮尺1/8ステイブ・サイロ模型の

地震波加振実験結果と等価線形化した地震応答解析結果

本研究における「ステイブ・サイロ要素」および「剛体間バネ剛性の評価方法」が、ステイブ・サイロの地震応答解析にも適用出来るかどうかを検討するため、ステイブ・サイロ模型を用いた地震波加振実験結果に対して、以下に示すような一連の数値シミュレーションを試みた。

模型実験および数値解析に用いた縮尺1/8ステイブ・サイロ模型を図3に示す。このサイロ模型は、直径80cm、高さ198.5cm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^3 ；幅5.0cm、高さ15.2cm、厚さ2.0cm)と32組のフープ(4mm径)で構成されている。

地震応答解析においては、ステイブ・サイロ模型を高さ方向に12要素分割し、モルタルの弾性係数を $2.5 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$ 、ポアソン比を $1/6$ 、フープの弾性係数を $2.1 \times 10^6 \text{kgf/cm}^2$ とした。また、運動方程式の数値積分は Newmarkの β 法($\beta = 1/4$)により、時間間隔を $\Delta t = 0.005$ 秒として計算を行なった。

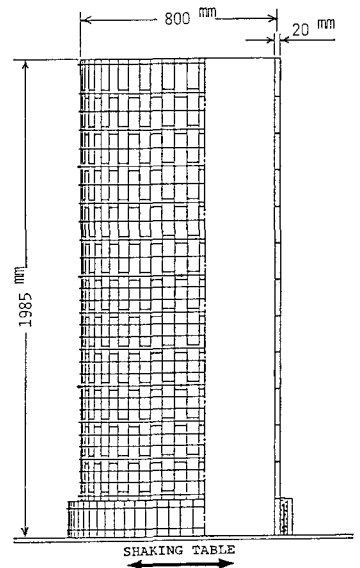


図3 縮尺1/8ステイブ・サイロ模型

地震波加振実験で使用した水平振動台入力地震波形を図4に示す。この地震波は根室半島沖地震(1973-6-17)の北海道厚岸町で得られた加速度記録であり、相似則に従って時間軸を1/8に圧縮してある。

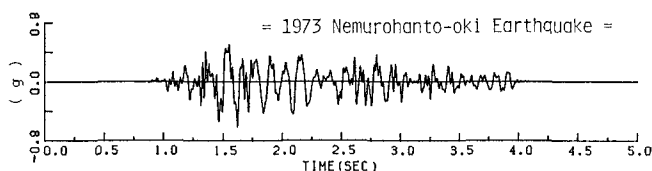


図4 水平振動台入力地震波形 [時間軸1/8圧縮]

模型実験では入力地震波の最大加速度を
108 gal、258 gal、652 gal、1,034 gal
(0.11 g、0.26 g、0.67 g、1.06 g) の

4段階に増大させながら、内部が空の状態のステイブ・サイロ模型を加振した。その地震応答特性としては、入力加速度レベルの増大に伴って、模型頂部での加速度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振動数領域に移行するという実験結果が得られている。

以下の地震応答解析では、ステイブ・サイロ要素における剛体間バネの剛性定数の低減率 α (ALPHA)を、最大入力加速度レベルに応じたひとつのパラメタとした。また、この動的解析では簡単のために粘性減衰を仮定したが、その減衰定数もパラメタ h (DAMP)とした。これらのパラメタ設定理由は、前述した入力加速度レベルの増大に伴う非線形な地震応答特性を考慮したものであり、等価線形化した地震応答解析の範囲内で可能な限りではあるが、地震波加振実験結果の再現化を試みるためである。

図5 (1)~(4)の各図は、ステイブ・サイロ模型頂部での加振方向応答加速度の時刻歴波形を、(a) 模型実験結果 と (b) 数値解析結果 とで比較したもので、それぞれ最大入力加速度レベル 0.11 g、0.26 g、0.67 g、1.06 g に対する結果である。なお、数値解析における2個のパラメタの設定値は、4段階の入力加速度レベルに対応して、それぞれ $\alpha=0.029/h=0.030$ 、 $0.024/0.030$ 、 $0.014/0.070$ 、 $0.005/0.150$ とした。これらの設定値は、応答加速度波形の卓越振動数および最大応答値を考慮しながら決定したものである。また、参考のために実験結果から求めた復元力曲線も、各図右上に示してある。

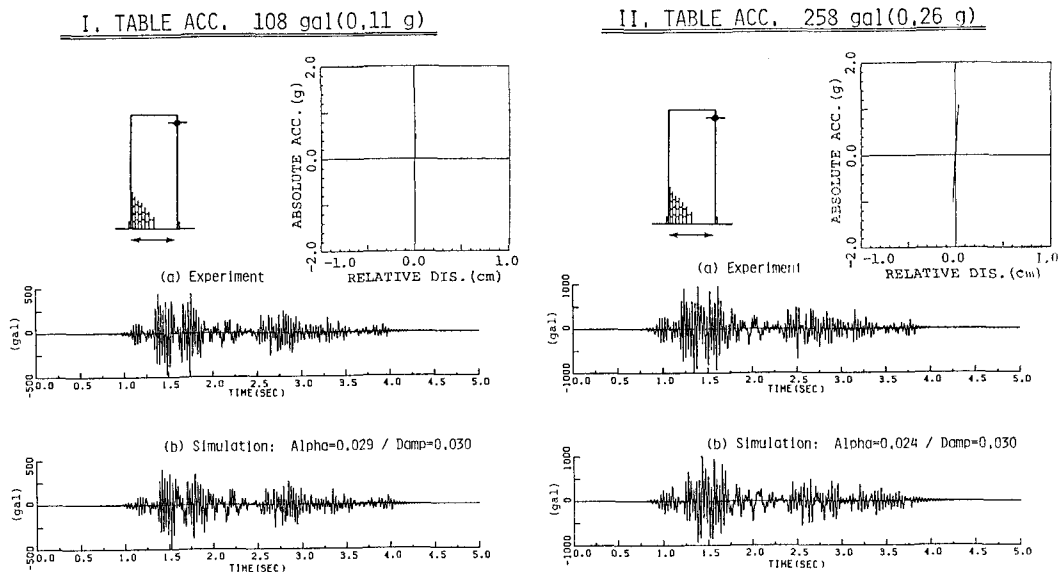
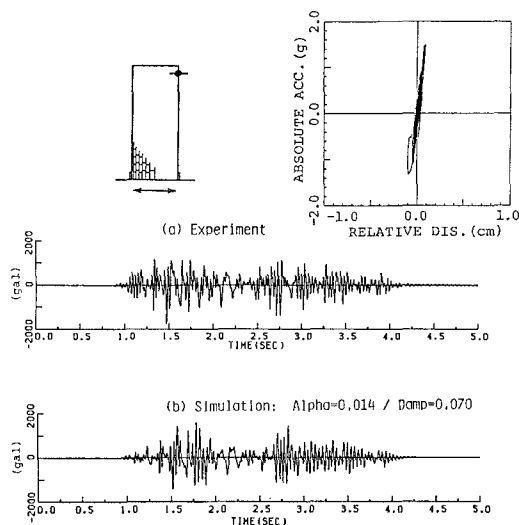


図5 (1)、(2) 模型頂部での地震応答加速度波形の比較(その1、その2)

III. TABLE ACC. 652 gal(0.67 g)



IV. TABLE ACC. 1,034 gal(1.06 g)

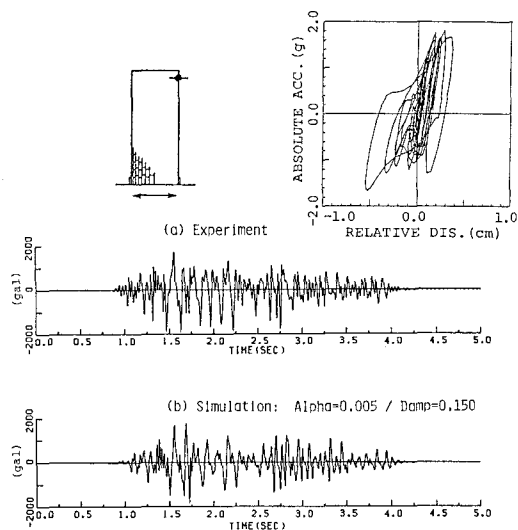


図5 (3)、(4) 模型頂部での地震応答加速度波形の比較(その3、その4)

個々の数値解析結果を対応する模型実験結果と比較してみると、復元力特性がほぼ線形とみなせる入力加速度レベル 0.67 g までの解析結果は、低減率 α を漸次低下させ、また減衰定数 h を増加させることで、実験結果の応答性状を比較的良く再現しており、最大応答値の相対誤差もそれぞれ 0.4%、8.4%、18.1%程度であった。しかし、入力加速度レベルが 1.06 g になると、復元力特性は顕著な履歴性状を示しており、数値解析結果と模型実験結果の応答性状にはかなりの相違が見られる。この程度の入力加速度レベルになると、剛体間バネのバネ剛性に履歴元力特性を持たせるなどして、非線形な地震応答解析が必要であることがわかる。

4. まとめ

不連続な壁体構造を持つステイブ・サイロ模型の地震応答解析に、「ステイブ・サイロ要素」および「剛体間バネ剛性の評価方法」を適用し、一連の数値シミュレーションを試みた。その結果、構造剛性の低減率と減衰定数をパラメタとする等価線形化地震応答解析の範囲内でも、地震波加振実験による応答性状を比較的良く再現出来ることが明らかになった。

《 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。
- 2) 佐々木康彦、芳村 仁：不連続構造を持つステイブ・サイロの動的モデル化と地震時挙動のシミュレーション、第8回日本地震工学シンポジウム論文集、pp.1995-2000、1990。