

I-41

不連続構造を持つステイブ・サイロの履歴復元力モデルと動的応答解析

北海道大学工学部 正会員 佐々木 康彦
北海道大学工学部 学生会員 中 込 淳
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) で締付けるといふ、不連続な壁体構造を持つ粉粒体貯蔵用サイロ構造物である。このようなステイブ・サイロの地震時挙動に関する解析的な研究を目的として、“ステイブ・サイロ要素” と名付けた新しい動的解析モデルおよび壁体構造の不連続性を考慮した構造剛性評価法の開発を行なった。そして、これらステイブ・サイロ要素および剛性評価法を地震時挙動の数値シミュレーションに適用し、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きた¹⁾。

本研究ではさらに、「ステイブ・サイロの壁体構造は入力加速度レベルの増大に伴って顕著な履歴応答性状を示す」という模型実験結果に着目し²⁾、履歴復元力特性と構造剛性の低減率とを関連付けた復元力モデルによるステイブ・サイロの非線形な動的応答解析を試みた。

2. ステイブ・サイロ壁体構造の動的解析モデルの概要

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である¹⁾。

円周方向 N 個の剛体で構成される円筒状 RSH 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1に示す。ステイブ・サイロ要素と呼ぶ、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、②とし、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。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、その節線変位の振幅をステイブ・サイロ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。

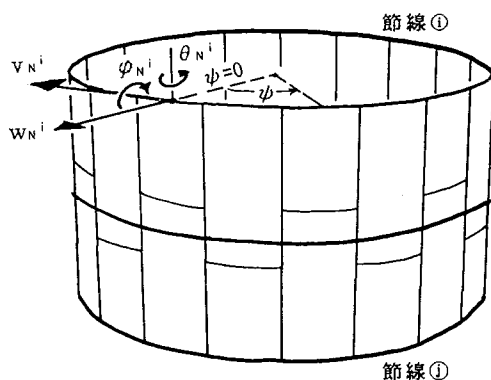


図1 ステイブ・サイロ要素
および節線変位

3. 履歴復元力特性の解析モデル化と構造剛性の低減率

3.1 履歴復元力特性をもつ構造系の運動方程式

一般に、非線形な復元力特性をもつ多自由度構造系に地震動(地動加速度)が作用する場合の運動方程式は次式で与えられる。

$$[M_N] \{\ddot{\delta}_N\} + [C_N] \{\dot{\delta}_N\} + \{R_N(\delta)\} = \{Q_0(t)\} \quad (1)$$

ここで、 $[M_N]$ & $[C_N]$: 構造質量および粘性減衰マトリックス、 $\{\ddot{\delta}_N\}$ & $\{\dot{\delta}_N\}$: 相対加速度・相対速度ベクトル(ただし、支持点での諸量は除く)、 $\{R_N(\delta)\}$: 相対変位 $\{\delta_N\}$ の関数である非線形復元力特性、そして $\{Q_0(t)\}$: 地震動に基づく有効外力ベクトルを表わす。

非線形構造系の応答解析に際して、微小な時間間隔 Δt において生ずる慣性力、減衰力、復元力、外力の増分量の動的な釣合を表わす増分形式の運動方程式を(1)式から誘導すると、

$$[M_N] \Delta \{\ddot{\delta}_N\} + [C_N] \Delta \{\dot{\delta}_N\} + \Delta \{R_N(\delta)\} = \Delta \{Q_0(t)\} \quad (2)$$

となる。さらに、この式における非線形復元力項を履歴復元力特性と考え、その増分量を相対変位の関数である構造接線剛性と相対変位の増分との積で近似すると、すなわち、

$$\Delta \{R_N(\delta)\} \cong [K_N(\delta)] \Delta \{\delta_N\} \quad (3)$$

と置くと、次式のような線形化した増分形式の運動方程式を得る。

$$[M_N] \Delta \{\ddot{\delta}_N\} + [C_N] \Delta \{\dot{\delta}_N\} + [K_N(\delta)] \Delta \{\delta_N\} = \Delta \{Q_0(t)\} \quad (4)$$

以上の定式化により、履歴復元力特性をもつ構造系の非線形応答解析は、時間間隔 Δt に対して線形化した運動方程式(4)を逐次積分するという一連の近似的な数値解析によって実行される。

3.2 履歴復元力特性の解析モデル化

過去に、縮尺1/8模型用ステイブ・サイロを用いた水平振動台による地震波加振実験を実施し、不連続構造を持つステイブ・サイロの地震応答特性に関する実験的な解明を進めてきた。サイロ模型頂部(Top)における実測絶対加速度記録と数値積分で求めた相対変位記録を利用する方法³⁾により、ステイブ・サイロ壁体構造の復元力特性の検討を行なった。その結果、入力加速度レベルの増大に伴って履歴ループの剛性勾配が低下し、その面積が増加する傾向をもつ軟化バネ型の履歴特性を示すことが明らかになった²⁾。

本研究ではこのようなステイブ・サイロ壁体構造の履歴復元力特性の解析モデル化として、Jennings氏が提案し、後藤氏らが改良を加えた“修正Jennings系”の履歴特性を採用した⁴⁾。

図2に示す修正Jennings系の上界・下界曲線および骨格曲線の方程式は次式で表わされる。

$$\text{上下界曲線: } (\mu - \mu_0)/2 = \{(q - q_0)/2 + \alpha [(q - q_0)/2]^r\} / (1 + \alpha) \quad (5)$$

$$\text{骨格曲線: } \mu = \{q + \alpha q^r\} / (1 + \alpha) \quad (6)$$

ここで、 μ 、 q はそれぞれ降伏変位、降伏力で無次元化した相対変位および復元力、 (μ_0, q_0) は相対速度の変換点での符号付き座標値、そして r および α がこの系のパラメタであり、それぞれ奇数の正定数および正定数をとる。このような修正Jennings系は、パラメタ r と α の変化によりかなり広範囲の履歴形状を表現できる長所をもつが、無次元化復元力 q が無次元化変位 μ の一価関数でないために逐次近似計算が必要となる。なお、修正Jennings系による非線形応答解析の履歴制御は、処女上界・下界曲線と骨格曲線を用いた復元力制御法および速度制御法によった⁵⁾。

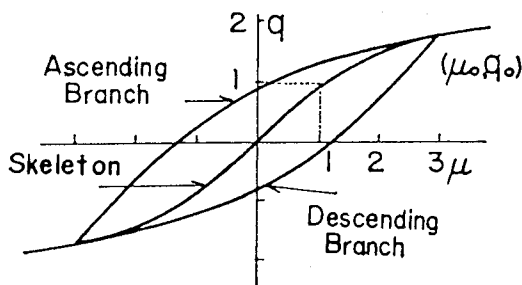


図2 修正Jennings系の履歴特性

3.3 構造剛性の低減率とその算定法

前述したステープ・サイロ要素を模型用ステープ・サイロあるいは実物のステープ・サイロに適用する場合、ステープ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・集中バネの剛性特性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、まず解析すべきステープ・サイロと“同一材料・同一寸法の連続体である円筒殻”を考え、その円筒殻と等価なバネ剛性定数によって計算される構造剛性マトリックス $[K_s]$ をひとつの基準構造剛性とする。次に、ステープ・サイロ壁体構造におけるステープ継目の存在に起因する剛性低下特性およびその履歴特性を表現するために、“構造剛性の低減率 λ ”を導入し、ここでは着目点（模型頂部）での相対変位 δ_T の関数 $\lambda = \lambda(\delta_T)$ とする。

このような低減率 $\lambda(\delta_T)$ を用いて、多自由度構造系に関する前節(4)式中の構造接線剛性マトリックスを次式のように定義する。なお、フープバネによる構造剛性マトリックスを $[K_H]$ で表わす。

$$[K_N(\delta)] = \{\lambda(\delta_T) \cdot [K_s] + [K_H]\} \quad (7)$$

さらには、その運動方程式(4)の逐次数値積分によって計算される着目点（模型頂部）での応答性状を、(5)式および(6)式の曲線で表示される1自由度系の修正Jennings系履歴特性として制御していく。また、その履歴制御過程で、(7)式における低減率は次式により算定する。

$$\lambda(\delta_T) \equiv k/k_{eq}; \quad k = \Delta q / \Delta \mu \quad (8)$$

ここで、 Δq および $\Delta \mu$ は、時間間隔 Δt における修正Jennings系の無次元化復元力・相対変位の増分、 k_{eq} は前述の円筒殻と等価な剛性定数を表わす。

4. 縮尺1/8模型用ステープ・サイロの地震応答解析

数値解析モデルとして用いた縮尺1/8模型用ステープ・サイロを図3に示す。この模型用サイロは直径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ープ(単位体積重量 2.09 gf/cm³；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、模型用ステープ・サイロを高さ方向に12要素分割し、モルタルの弾性係数を 2.5×10^5 kgf/cm²、ポアソン比を1/6、フープの弾性係数を 2.1×10^8 kgf/cm² とした。修正Jennings系のパラメタ値は $r=5$ 、 $\alpha=0.10$ を採用した。また、増分形式の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。

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 (0.11g、0.26g、0.67g、1.06g) の4段階に増大させながら、模型内部が空の状態のステープ・サイロを加振した。

そのうち、最大入力加速度レベル I : 0.11g と IV : 1.06g に対する模型頂部での応答加速度の時刻歴波形を、(a) 模型実験として図4(1)

および図4(2)に示す。また、右上の各図は実験結果から3.2節で述べた方法で求めた復元力曲線である。

さらに、図4(1)、(2)には(b)数値解析として、模型実験結果を再現するために行なった地震応答解析結果を示してある。入力加速度レベル0.11gに関しては、参考のために低減率 $\lambda=0.028$ (一定) とした場合の線形解析結果、1.06gに対しては前章で述べた履歴復元力モデルによる非線形解析結果である。

そして、図5は入力速度レベル1.06gに対する地震応答加速度波形のフーリエ振幅スペクトルを、模型実験と数値解析とで比較したものである。

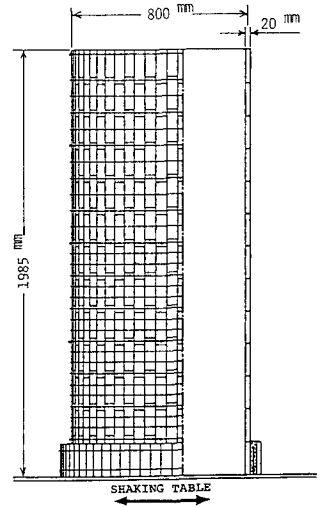


図3 模型用ステープ・サイロ
[幾何学的縮尺1/8]

I. TABLE ACC, 108 gal(0.11 g)

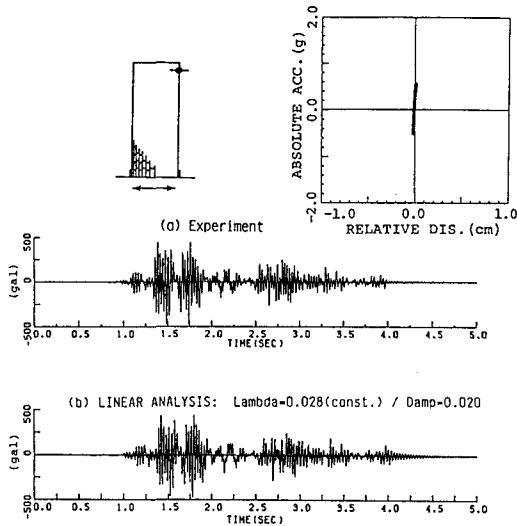


図 4 (1) 模型頂部での応答加速度波形の比較

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

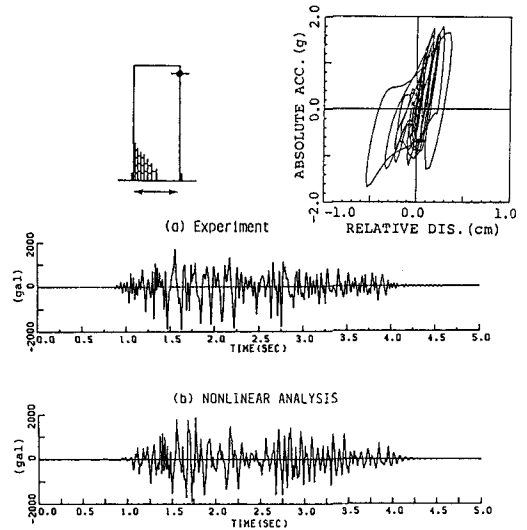


図 4 (2) 模型頂部での応答加速度波形の比較

入力レベル0.11gの場合は復元力曲線がほぼ直線状であるため、低減率を一定とした線形応答解析でも実験結果を非常に良く再現していることがわかる。さらに、入力レベルが1.06gまで増大した場合は顕著な履歴性状を示すために応答波形性状も0.11gの場合と明らかにことなるが、ここで得られた履歴復元力モデルによる非線形応答解析結果は支配的な卓越振動数成分もほぼ一致しており、実験結果の応答波形を比較的良く再現できていると考える。

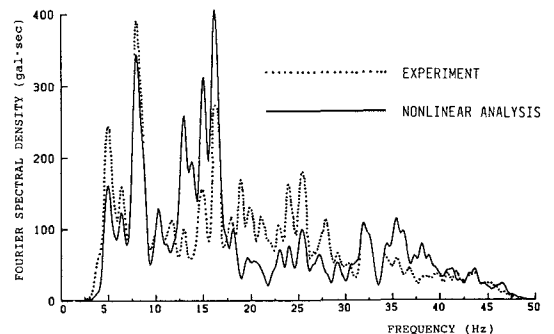


図 5 フーリエ振幅スペクトルの比較
[IV. TABLE ACC, 1.06 g]

参考文献

- 1) 佐々木康彦、芳村 仁：コンクリートスティブ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。
- 2) 佐々木康彦、芳村 仁：コンクリートスティブサイロの地震応答特性と不連続構造の影響に関する実験的研究、構造工学論文集、Vol.36A、pp.803-812、1990。
- 3) Iemura, H. and Jennings, P.C. : Hysteretic response of a nine-storey reinforced concrete building, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.3, No.2, pp.183-201, 1974.
- 4) 後藤尚男、家村浩和：強震時における1自由度系の塑性変形に関する考察、土木学会論文報告集、第184号、PP.57-67、1970。
- 5) Jennings, P.C. : Earthquake response of a yielding structure, Proc. of ASCE, Vol.91, No.EM4, pp.41-68, 1965.