

I-49

不連続構造を持つステープ・サイロの地震時エネルギー吸収能力に関する考察

北海道大学工学部 正会員 佐々木 康彦
建設省近畿地方建設局 正会員 中 込 淳
北海道大学工学部 正会員 芳 村 仁

1. まえがき

ステープ・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、ステープ・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てきた¹⁾。また「ステープ・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ープ・サイロの非線形な地震応答解析を試みた³⁾。本研究ではさらに、履歴復元力特性に関連するエネルギー応答解析を行ない、ステープ・サイロのエネルギー吸収能力について考察を加えた。

2. ステープ・サイロ壁体構造の動的解析モデルの概要

ステープ、フープ、ステープ継目というステープ・サイロ壁体構造の主要な構成要素をそれぞれ剛体、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・集中バネでモデル化し、サイロ壁体構造全体を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)とする。さらに、この円筒状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ステープ・サイロ要素と呼び、図1に示すような4個の変位・回転成分を節線変位とする¹⁾。

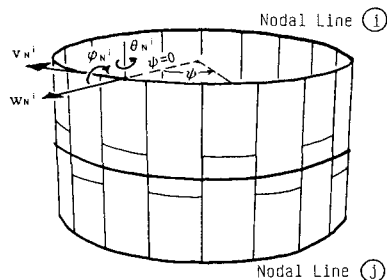


図1 ステープ・サイロ要素
および節線変位

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が作用する場合の運動方程式は、

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

ここで、 $[M_N]$ & $[C_N]$: 構造質量および粘性減衰マトリックス、 $\{R_N(\delta)\}$: 相対変位ベクトル $\{\delta_N\}$ の関数である非線形復元力特性、 $\{Q_o(t)\}$: 地震動に基づく有効外力ベクトル。

非線形構造系の応答解析に際して、微小な時間間隔 Δt に対する増分形式の運動方程式を(1)式から誘導し、さらに非線形復元力項の増分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、次式のような線形化した増分形式の運動方程式を得る。

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

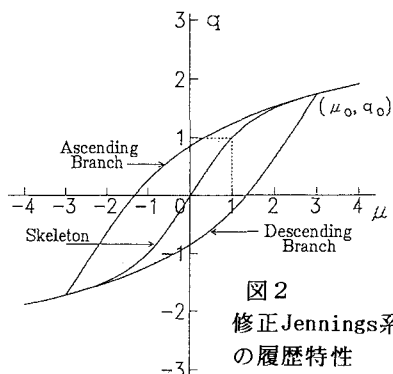


図2
修正Jennings系
の履歴特性

3.2 履歴復元力特性の解析モデル化

ステイブ・サイロ壁体構造の履歴復元力の解析モデルとして修正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、

$$\text{上下界曲線: } (\mu - \mu_0)/2 = \{(q - q_0)/2 + \alpha [(q - q_0)/2]^r\} / (1 + \alpha) \quad (3)$$

$$\text{骨格曲線: } \mu = \{q + \alpha q^r\} / (1 + \alpha) \quad (4)$$

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。

3.3 構造剛性の低減率とその算定法

始めに、解析すべきステイブ・サイロと同一材料・同一寸法の連続体である円筒シェルを考え、その円筒シェル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 $[K_S]$ を一つの基準構造剛性とす。次に、ステイブ・サイロ壁体構造におけるステイブ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(2)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は $[K_H]$ で表わす。

$$[K_N(\delta)] = \{\lambda(\delta_T) \cdot [K_S] + [K_H]\} \quad (5)$$

さらには、その運動方程式(2)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、(3)式および(4)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、その履歴制御過程において、(5)式における低減率は次式により算定する。

$$\lambda(\delta_T) \equiv k/k_{eq}; \quad k = \Delta q / \Delta \mu \quad (6)$$

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} は前述の円筒シェルと等価な剛性定数を表わす。

4. 縮尺1/8模型用ステイブ・サイロの地震応答解析

数値解析モデルとして、図3に示す縮尺1/8模型用ステイブ・サイロを用いた。この模型用サイロ(直径0.8m、高さ2.0m)は円周方向50個、高さ方向13段のモルタル製模型用ステイブと32組のフープで構成されている²⁾。また、地震応答解析では、修正Jennings系のパラメタを $r=5$ 、 $\alpha=0.10$ 、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 $\Delta t=0.001$ 秒として計算を行なった。

図5(a)、(b)は最大入力加速度レベル1.06gに対する模型頂部での応答加速度の時刻歴波形で、それぞれ模型実験および数値解析の結果である。これらの比較から、前章で述べた履歴復元力モデルによる非線形応答解析は模型実験結果

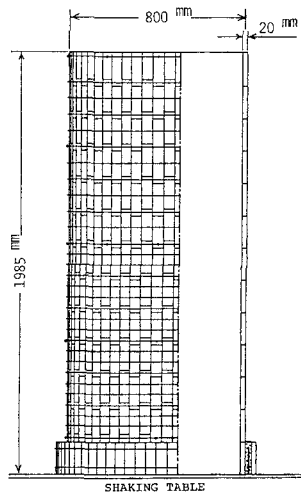


図3 模型用ステイブ・サイロ
[幾何学的縮尺1/8]

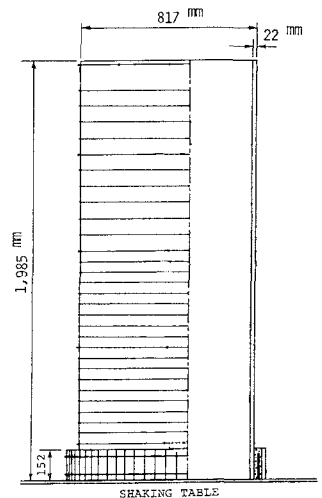


図4 円筒シェル模型
(一体式壁体構造)

の応答性状を比較的良く再現できており(最大応答値の相対誤差 1.3%)、履歴特性と構造剛性の低減率とを関連付けた復元力特性のモデル化の妥当性を裏付けている。

5. エネルギー応答解析

構造物に入力する地震動エネルギーは一時的に運動エネルギーやひずみエネルギーとして蓄えられるが、地下逸散減衰などを除いて、最終的には構造物自身の減衰機構により入力エネルギーを消費しなければならない。したがって、エネルギー吸収能力は構造物の損傷・破壊現象など、耐震性と密接に関連している⁵⁾。

履歴復元力特性を有する多自由度構造系のエネルギー応答に関する基本式は、第3章の運動方程式(1)の各項に $\{\dot{\delta}_N\}^T dt$ を乗じて積分すれば次式が得られる。

$$\int \{\dot{\delta}_N\}^T [M_N] \{\ddot{\delta}_N\} dt + \int \{\dot{\delta}_N\}^T [C_N] \{\dot{\delta}_N\} dt + \int \{\dot{\delta}_N\}^T \{R_N(\delta)\} dt = \int \{\dot{\delta}_N\}^T \{Q_e(t)\} dt \quad (7)$$

ここで、左辺の各項はそれぞれ運動エネルギー W_k 、粘性減衰エネルギー W_D および履歴吸収エネルギー W_H を、右辺は地震動による総入力エネルギー E_G を与える。さらに、運動エネルギー W_k が累積量ではないことから、構造系の振動終了時でのエネルギーの釣り合い関係は次式で表わされる。 $W_D + W_H = E_G$ (8)

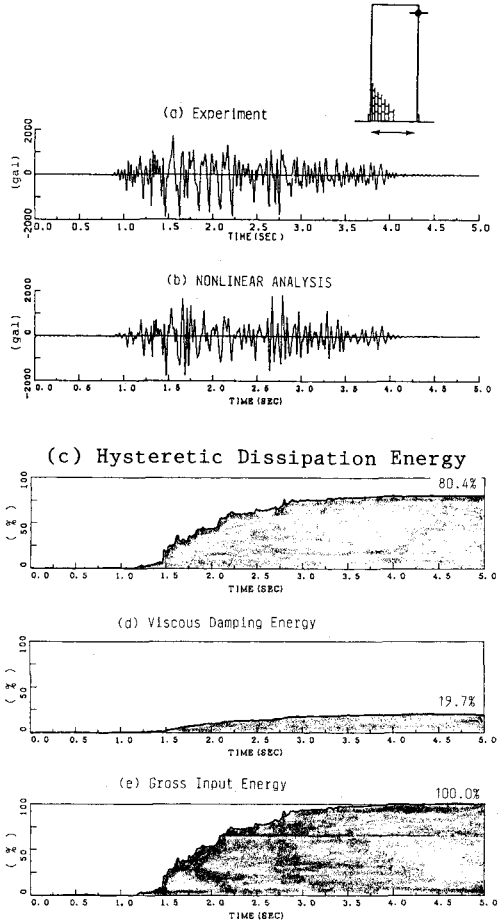


図5 応答加速度と累積エネルギーの時刻歴
[模型用スティフ・サイロ]

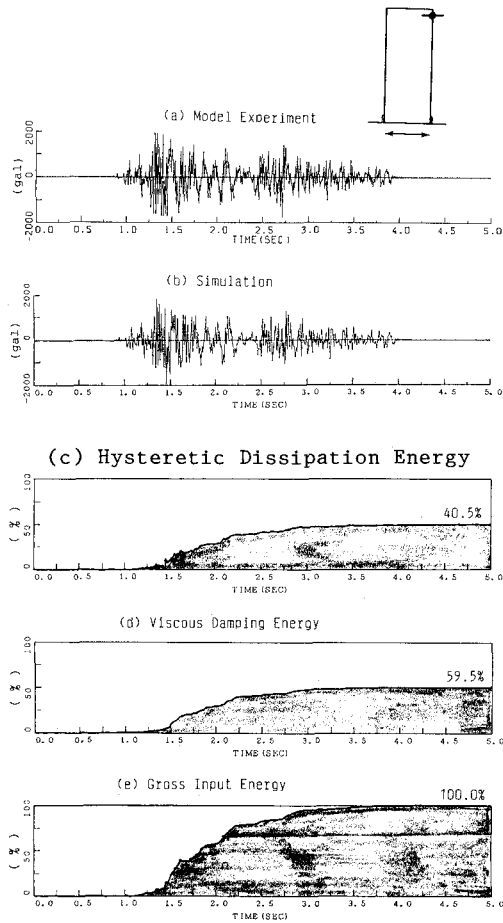


図6 応答加速度と累積エネルギーの時刻歴
[円筒シェル模型]

6. 地震応答時のエネルギー解析結果および考察

図5(c)、(d)および(e)は前述の模型用スティブ・サイロの地震応答過程におけるエネルギー累積の時刻歴である。これらは最大入力加速度レベル1.06gに対する数値解析結果であり、上から順に履歴吸収エネルギー、粘性減衰エネルギーおよび総入力エネルギーを表わす。なお、縦軸の数値(%)は総入力エネルギーの最終累積値に対する各エネルギー値の割合である。

地震波の入力とともに総入力エネルギーが累積しており、特に主要動部分で急増する。他方、履歴復元力によるエネルギー吸収が粘性減衰に比べると支配的であり、最終的には総入力エネルギーの約80%までが履歴復元力特性によるものであることがわかる。

スティブ・サイロの持つ不連続構造の影響を比較検討するために製作した“円筒シェル模型”を図4に示す。この模型の材料および形状・寸法は、前述の模型用スティブ・サイロとほぼ同一であり、外壁もフープと同様に締付けてある。したがって、円筒シェル模型と模型用スティブ・サイロの構造上の相違点は「壁体継目(スティブ継目)」の有無だけである。

図6(a)、(b)は円筒シェルの模型頂部における応答加速度の時刻歴波形を、模型実験および数値解析とで比較したものである。また、図6(c)、(d)および(e)には、図5と同様に円筒シェル模型の地震応答時における履歴吸収エネルギー、粘性減衰エネルギーおよび総入力エネルギーの時刻歴を示す。以上のエネルギー応答解析の比較結果から、不連続構造を持つスティブ・サイロの場合はスティブ継目の存在に起因して、履歴復元力特性によるエネルギー吸収能力が支配的なことが明らかになった。

模型用スティブ・サイロによる振動実験では、入力地震波の最大加速度を108 gal、255 gal、652 gal、1,034 gal (0.11 g、0.26 g、0.67 g、1.06 g) の4段階とした。各入力加速度レベルでの実験結果に対し、図5(a)～(e)と同様な地震応答解析並びにエネルギー解析を行ない、総入力エネルギー累積値に対する履歴吸収エネルギーおよび粘性減衰エネルギー累積値の分担比を算出した結果が図7である。

履歴復元力によるエネルギー吸収に関して、入力加速度レベルにそれほど依存せずに約75～80%という卓越した高い分担比であること、また低入力加速度レベルからすでに約75%という高い数値を示すことが特徴的である。これらの特徴はスティブ・サイロがスティブ継目の挙動によって、壁体材料の降伏以前の段階から履歴復元力特性を示し、それによるエネルギー吸収能力が早期に発現するためと考える。

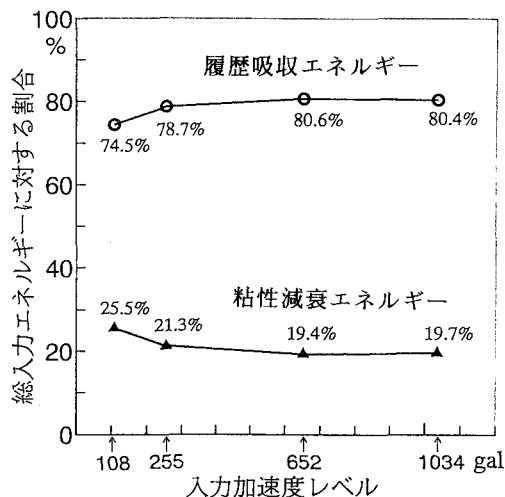


図7 入力加速度レベルによる履歴吸収および粘性減衰エネルギーの分担比

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) 佐々木康彦、中込 淳、芳村 仁：不連続構造を持つスティブ・サイロの履歴復元力モデルと動的応答解析、土木学会北海道支部論文報告集、第48号、pp.217-220、1992。
- 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) 秋山 宏：建築物の耐震極限設計、東京大学出版会、1980。