

I — 9 スティブ・サイロ壁体構造の履歴復元力特性とその動的応答について

北海道大学工学部	正会員	芳 村	仁
北海道大学工学部	正会員	佐々木	康 彦
東電設計(株)	正会員	丹 羽	顕

1. まえがき

近年、石炭などの鉱工業用原料・穀物・飼料等の貯蔵を目的とした、各種大型サイロが数多く建設されている。なかでも、コンクリートスティブ・サイロは鋼製あるいは鉄筋コンクリート製サイロと比較して経済性・施工性に優れているため、アメリカやカナダでは50年来の使用実績を持ち、現在ではサイロ全体の約7割を占めていると言われる。

このスティブ・サイロは、スティブが樽や桶の側板を意味するように、コンクリートブロック(スティブ)を組合せながら円筒状に積上げ、外壁を鉄筋(ロッド)で締付けるという不連続な壁体構造を有している。そのため、鉄筋コンクリート製サイロのような一体式壁体構造に比べると、その動的挙動に関して不明な点が多く、地震多発地帯である我国では耐震安全性の検討が必要であると考えられる。

著者らは現在まで、縮尺1/6スティブ・サイロ模型振動実験により、その動的挙動および内容物の影響について研究を進めてきた。¹⁾ 本報告は、スティブ・サイロ壁体模型実験および1質点履歴復元力モデルによる非線形地震応答解析から、この不連続な壁体構造の持つ復元力特性とその動的応答について検討を加えたものである。

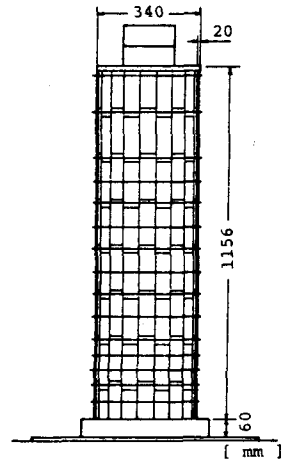


図1 スティブ・サイロ壁体模型

2. スティブ・サイロ壁体模型実験

2.1 模型実験概要

スティブ・サイロ壁体模型は、モルタル製の模型用スティブ(15.2cm×5.0cm、厚さ2.0cm)を円周方向20個、高さ方向8段に組合せながら積上げ、外壁を3mm径のロッド15組で締付けてある。模型の形状および寸法を図1に示す。本研究では、解析からもこの壁体構造の復元力特性を検討するため、模型頂部に分銅(重量23.6kg)を取付け、このスティブ・サイロ壁体模型を1質点振動系として取扱った。

模型実験として、静的水平加力実験および水平振動台による正弦波・地震波加振実験を実施し、模型頂部の水平方向変位、加速度および壁体のひずみの計測を行なった。ここで使用した入力地震波は、根室半島沖(厚岸)、十勝沖(八戸)および日高山系地震(広尾)の加速度記録である。なお、この模型の共振振動数(20Hz)を考慮して、時間軸を1/6に圧縮した波形を用いた。

2.2 実験結果および考察

正負交番漸増荷重による静的水平加力実

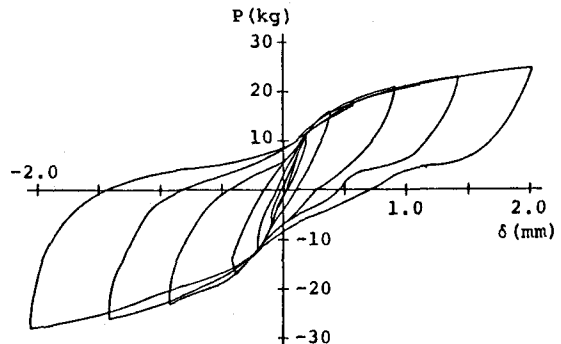


図2 荷重一頂部水平変位曲線

表1 地震波最大応答値および応答倍率

入 力 波	最大入力加速度 (GAL)	最大応答加速度 (GAL)	応答倍率
根室半島沖 (厚岸)	96	273	2.84
	229	410	1.79
十 勝 沖 (八戸)	100	251	2.51
	259	443	1.71
日 高 山 系 (広尾)	92	304	3.30
	264	417	1.58

験から得られた、模型頂部における荷重—変位曲線(静的復元力特性)を図2に示す。各折返し変位は、 ± 0.1 、 ± 0.2 、 ± 0.4 、 ± 1.0 、 ± 1.5 、 ± 2.0 mmである。この結果から、ステイブ・サイロのような壁体構造は顕著な履歴復元力特性を示し、その骨格曲線は軟化パネ型であることがわかる。また、変位量の増大に伴って履歴ループの剛性勾配も漸次低下の傾向を示している。履歴ループの折返し点を結んだ直線の勾配は、前述の折返し変位に対応して、それぞれ 680、569、423、233、172、129 kg/cm であった。なお、この実験の範囲では、壁体のひずみが最大でも30マイクロ程度であり、壁体にひびわれは全く発生していない。したがって、この壁体構造の履歴復元力特性は、壁体材料の降伏以前の段階から生じることにも明らかになった。

加振振幅20gal、加振振動数1~50Hzでの正弦波加振実験から得られた、模型頂部での加速度共振曲線によると、この模型の共振振動数は 20Hz であった。

地震波加振実験で使用した根室半島沖地震の厚岸で観測された加速度記録は、5.9Hzに卓越振動数を持つ。同様に、十勝沖(八戸)は 5.2、7.5、11.8Hzに、日高山系(広尾)は 21.8、33.2Hzに卓越振動数がある。この3種類の地震波を用い、2段階の入力最大加速度レベルで加振した場合の、模型頂部での最大応答加速度とその応答倍率を表1に示す。これより、この壁体構造の動的応答特性として、加振振幅の増大に伴って応答倍率が著しく低下することがわかる。

図3は、入力最大加速度229galの根室半島沖地震波および実測絶対応答加速度である。これらの記録から数値積分により相対変位を求め、地震波応答時の復元力曲線を描いたのが図4である。それぞれ、応答初期(0.6~0.8sec)、最大応答時(1.6~1.8sec)および応答終期(4.35~4.65sec)のものである。この結果から、地震波応答時においても、応答振幅の増大に伴って履歴ループの面積増加、剛性勾配の低下という履歴復元力特性を示すことがわかる。また、前述の応答倍率の低下は、この壁体構造の履歴復元力特性に起因すると考えられる。

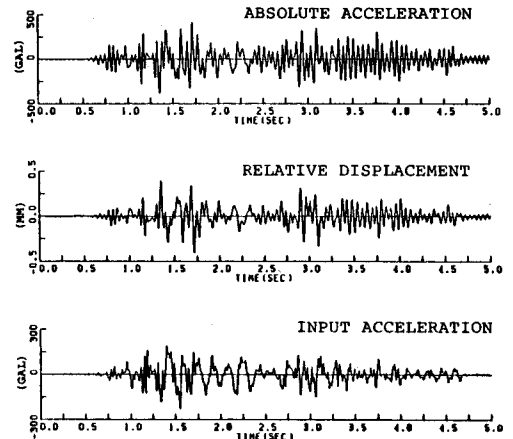


図3 入力地震波形および応答波形(根室半島沖、229GAL)

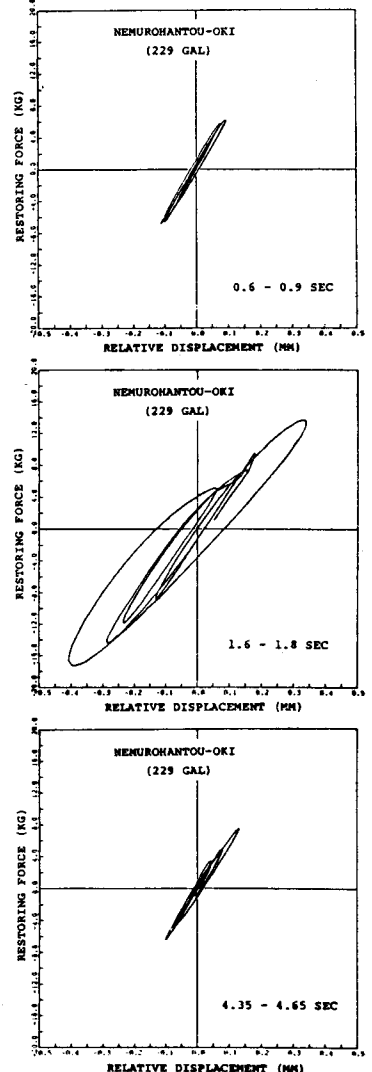


図4 地震波応答時復元力曲線(根室半島沖、229GAL)

3. 1 質点履歴復元力モデルによる非線形地震応答解析

ステイブ・サイロ壁体構造の荷重－変位特性（静的復元力特性）と動的復元力特性との関連、およびその動的応答を検討するため、1 質点履歴復元力モデルによる非線形地震応答解析を行なった。なお、50Hzまでの振動数範囲では、この壁体模型は20Hzにただひとつの共振点を持つだけであり、模型頂部での動的応答に関しては、1 質点モデルで十分に検討が可能であると考えられる。

3.1 1 質点履歴復元力モデル

一般に、非線形復元力特性をもつ 1 質点振動系に地震動が作用する場合の運動方程式は次式で表わされる。

$$M\ddot{X} + F(\dot{X}, X) = -M\ddot{Z} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 M ：質量、 X ：相対変位、 $\ddot{Z}$ ：地動加速度、 $F(\dot{X}, X)$ ：非線形復元力特性

本解析では、復元力特性 $F(\dot{X}, X)$ として静的水平加力実験結果を用いた。すなわち、図 2 に示した荷重－変位曲線を多数の折線で近似し、Poly-linear として計算に使用した。また応答計算では振動重量を 41.5kg とした。頂部に分銅を取付けたサイロ壁体模型の振動時において、分銅の重量 (23.6 kg) のほか、壁体重量の一部も慣性力に関与すると考えられる。そこで、正弦波 20gal、20Hz 加振時の絶対応答加速度 216gal による慣性力と、その時の応答変位 0.14mm に対応する復元力 9.14kg を等置して等価振動重量 41.5kg を求めた。これは、壁体重量の 35% を付加したことに相当する。以上の前提による本解析の運動方程式は次式で表わされる。

$$\hat{M}\ddot{X} + R(X) = -\hat{M}\ddot{Z} \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $\hat{M}$ ：等価質量、 X ：相対変位、 $\ddot{Z}$ ：入力加速度、 $R(X)$ ：履歴復元力特性（荷重－変位特性）

3.2 解析結果および実験結果との比較

根室半島沖地震波（入力最大加速度 229gal）を入力した場合の、非線形応答解析による応答加速度を、実験結果と比較して図 5 (a)、(b) に示す。最大応答値の相対誤差は 6.3% 程度であり、振幅・位相とも良く一致した結果が得られた。比較のため、同図 (c) に線形応答解析結果を示す。この計算に用いたバネ定数は、荷重－変位曲線の初期剛性 638.8kg/cm、減衰定数は共振曲線から求めた 6% である。最大応答値が実験値より 42.2% も大きめであり、その発生時刻も異なっていることがわかる。図 6 は、十勝沖地震波（入力最大加速度 259gal）の場合の、実験と解析結果の比較である。この場合も、最大応答値の相対誤差は 4.5% 程度であり、両者は良い一致を示した。また、図 7 は根室半島沖地震波に対する復元力曲線を比較したものであり、解析では復元力特性を折線で近似しているため、形状が多少滑らかではないが、ほぼ実験結果を再現していると言える。

このように、静的復元力特性が動的復元力特性に適用できたことから、この壁体構造の履歴復元力特性は応答速度に依存しないと考えられる。また、ここで示した解析モデルのように、速度 $\dot{X}$ の関数とした減衰力（たとえば粘性減衰力など）を加えない方がより実験結果に近い値を示すことから、この壁

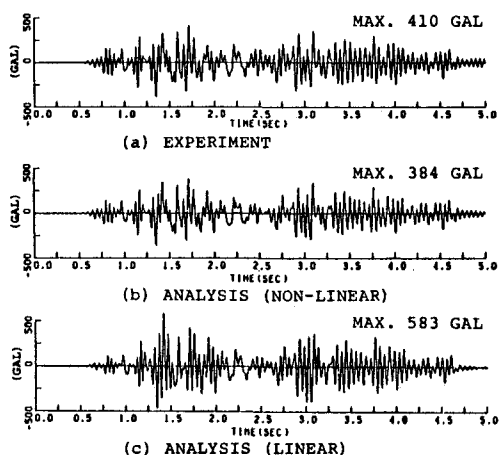


図 5 応答加速度の比較（根室半島沖、229GAL）

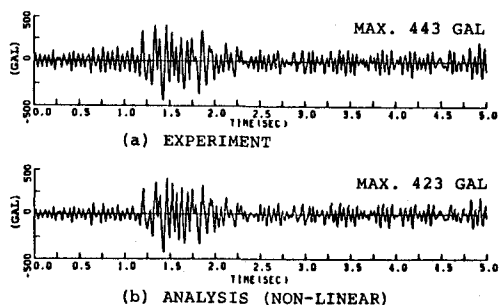


図 6 応答加速度の比較（十勝沖、259GAL）

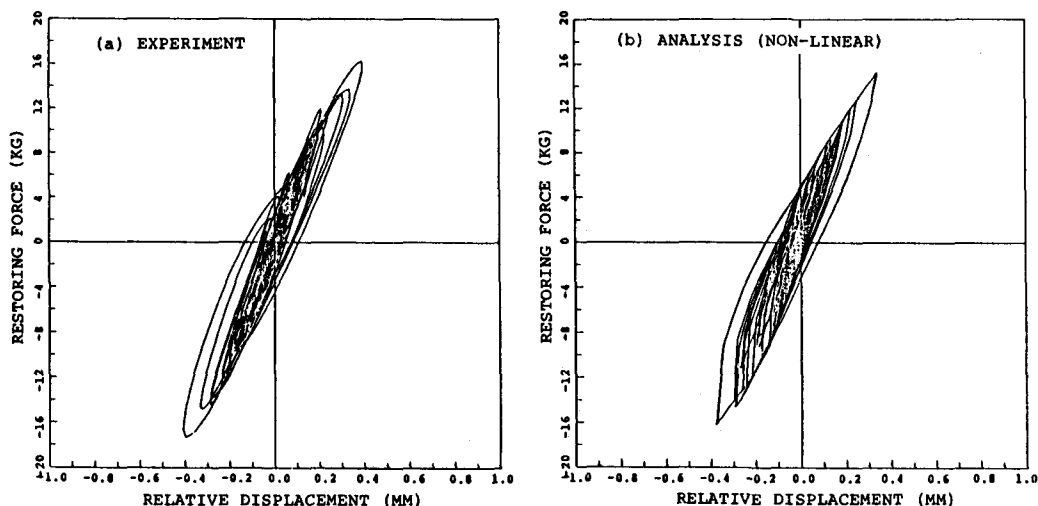


図7 地震波応答時復元力曲線の比較 (根室半島沖、229GAL)

体構造の抵抗力としては履歴復元力だけで、その動的応答を十分に表現できることが明らかになった。

以下、数種の入力最大加速度に対する、この履歴復元力モデルによる応答解析結果を示す。表2は、根室半島沖地震波に対する応答加速度と応答変位の最大値、および加速度応答倍率である。応答倍率が漸次低下し、入力500galで約1.0倍になることがわかる。また、図8は入力229gal、500galに対する応答加速度のパワースペクトルを比較したものである。ピーク位置は変化しないが、入力最大加速度の増大に伴って低振動数成分が卓越していく傾向を示している。

表2 地震波最大応答値
(根室半島沖、解析)

INPUT ACCEL. (gal)	RESPONSE ACCEL. (gal)	RATIO	RELATIVE DIS. (mm)
96	226	2.35	0.159
229	384	1.68	0.381
500	506	1.01	0.865

4. まとめ

ステイブ・サイロ壁体模型実験および1質点履歴復元力モデルによる非線形地震応答解析を通じて、ステイブ・サイロのような壁体構造は壁体材料の降伏以前の段階から顕著な履歴復元力特性を示すこと、静的復元力特性が動的復元力特性に適用できること、その動的応答は履歴復元力だけで十分に表現できることが明らかになった。

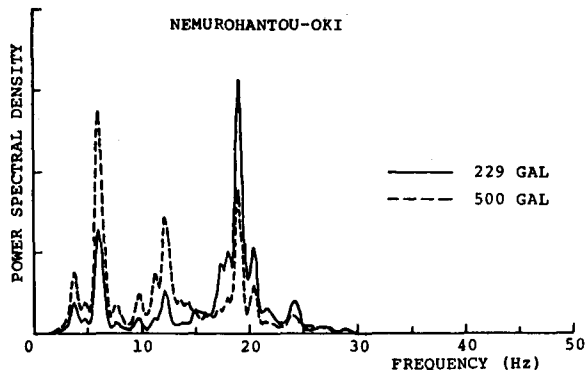


図8 応答加速度のパワースペクトル

参考文献

- 1) 芳村 仁、佐々木康彦、堂腰 純：ステイブ・サイロの動的挙動と内容物の影響について、土木学会北海道支部論文報告集、第38号、1982
- 2) 佐々木康彦、芳村 仁、堂腰 純：コンクリートステイブ・サイロの動的挙動に関する模型振動実験、第6回日本地震工学シンポジウム講演集、1982
- 3) National Silo Association: Design Standards for Concrete Stave Silos、July、1974