

(119) 一体式構造との比較による不連続なサイロ構造物の地震応答性状

北海道大学工学部 正会員 佐々木 康彦
 (財)電力中央研究所 正会員 山本 広祐
 北海道大学工学部 正会員 芳村 仁

1. まえがき

食糧・酪農飼料・鉱工業原料の海外依存度が極めて高い我が国では、穀物・石炭などの貯蔵のために鉄筋コンクリート製サイロあるいは鋼製サイロが数多く利用されており、備蓄規模の拡大に応じてますます大型化の傾向を見せている。他方、欧米では70年来の使用実績を持ち、経済的で施工性にも優れた“コンクリートステイブ・サイロ (concrete stave silo)”が、工業用・農業用大型貯蔵施設として広く普及している。しかし、このステイブ・サイロ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サイロであり、その動的挙動や耐震性について解明すべき点も多く残されている。

著者等は縮尺1/8ステイブ・サイロ模型実験により、このような不連続なサイロ構造物の振動特性・地震時挙動と内容物の影響に関する検討を進めてきた¹⁾。本報告は、そのサイロ模型と同一材料・同一寸法の“一体式壁体模型”による振動実験を実施し、不連続構造と一体式構造との動的挙動の比較・検討を通じて、ステイブ・サイロにおける地震応答性状の特徴を明確にしたものである。

2. 模型振動実験概要

縮尺1/8ステイブ・サイロ模型(図1)および水平振動台による各種振動実験の概要については文献1)に記述した。ここでは、図2に示した一体式壁体模型に関する実験概要を述べる。この模型はモルタル製円筒シェルで、外径81.7cm、高さ198.5cm、壁厚2.2cm、単位体積重量2.26gf/cm³、圧縮強度約470kgf/cm²である。模型の外壁はステイブ・サイロ模型と同様に、32本のフープ(4mm径の軟鋼線材)に8.5kgf・cmのトルクを与えて締付けてある。また、模型の下端もサイロ模型と全く同じ支持状態とした。したがって、この一体式壁体模型とステイブ・サイロ模型との構造上の相違点は「壁体継目(ステイブ継目)」の有無だけである。内容物としては米(単位容積重量0.70~0.75gf/cm³)を用い、その詰込み深さは模型高さの約80%とした。

振動台入力地震波は、十勝沖地震(1968-5-16)の八戸でのEW成分、根室半島沖地震(1973-6-17)の厚岸での厚岸大橋橋軸直角方向成分の加速度記録である。ただし、時間軸はサイロ模型実験と同様に1/8に圧縮して用いた。以下、正弦波加振実験および

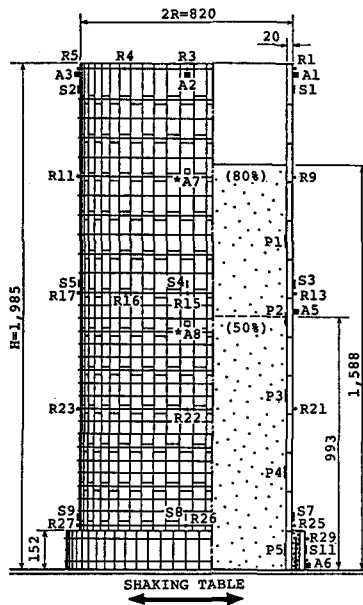


図1 縮尺1/8 ステイブ・サイロ模型および主要な計測器位置

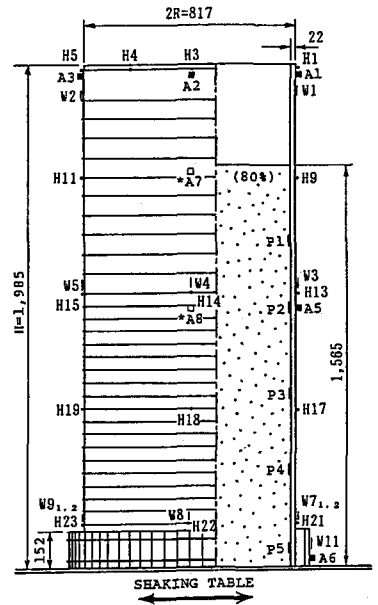


図2 一体式壁体模型および主要な計測器位置

び振動台の入力加速度レベルを段階的に増大させた地震波加速度増大実験から得られた主要な結果を比較して述べる。

3. 振動特性の比較および考察

図3は正弦波定常加振(振幅20gal)による模型上部での加速度共振曲線を、ステイブ・サイロ模型(STAVE)と一体式壁体模型(MONO.)とで比較したものである。模型内部が空の状態(壁体単独):[Empty]では、円形振動モードに対応する共振振動数が一体式壁体模型の46Hzに比べ、ステイブ・サイロ模型は31Hzであり、ステイブ継目による壁体構造の剛性低下を表わしている。また、継目の減衰性から共振点での応答倍率も約40%減少している。さらに、ステイブ・サイロ模型では23Hzに楕円形振動モードに対応する小さなピークが見られる。

内容物80%詰込み状態:[Full(80%)]では内容物の質量効果により、両模型とも模型内部が空の状態に比べて共振振動数が約 2/3に低下している。また、共振点での応答倍率はステイブ・サイロ模型でも57%、一体式壁体模型では26%にまで激減し、内容物の減衰効果が著しいことがわかる。なお、ステイブ・サイロ模型の場合、この60Hzまでの加振振動数範囲では、内容物を詰込むことで楕円形振動モードが生じなくなった。

4. 地震応答性状の比較および考察

4.1 地震波応答倍率の推移

入力地震波の最大加速度レベルの増大に伴う、壁体上部での加速度応答倍率(=最大応答加速度/最大入力加速度)の推移を図4に比較して示す。全体的な推移傾向をみると、一体式壁体模型の場合、内容物の有無によらず入力加速度が約250galレベルを越えると、1.8~2.6倍の範囲ではほぼ一定値となっている。これに比べてステイブ・サイロ模型の場合、入力加速度レベルの増大に伴って応答倍率が漸次減少していく、非線形な地震応答性状を示すことが特徴的である。なお、入力地震波の卓越振動数と模型の共振振動数との関係から、応答倍率は模型内部が空の状態よりも内容物詰込み状態の方が上回っている実験結果も得られ、「内容物が減衰効果として作用するため、内部が空の状態に比べて壁体の応答量は減少する」とは一概に断定でき

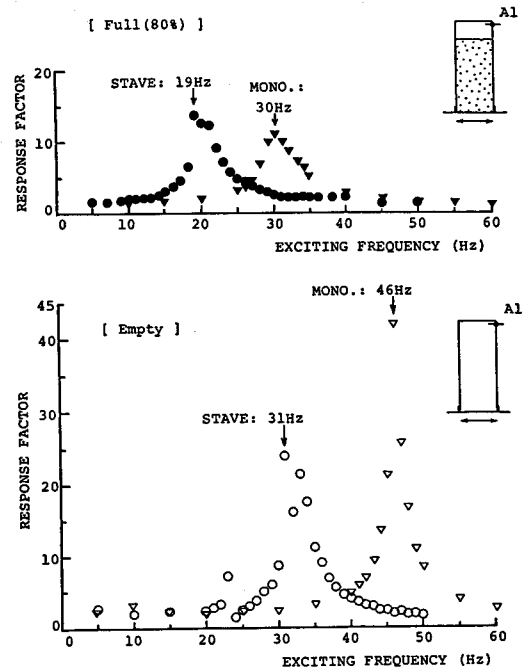


図3 模型上部での加速度共振曲線の比較

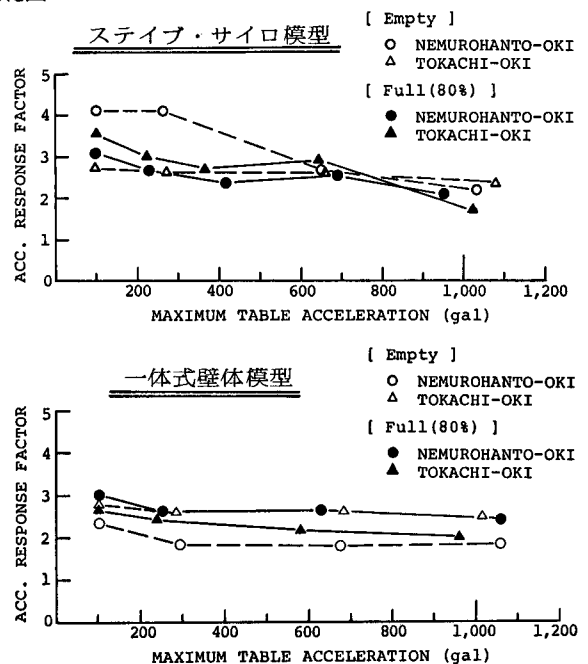


図4 入力加速度レベルの増大に伴う地震波応答倍率の推移の比較

ないことがわかる。

4.2 応答加速度の卓越振動数の推移

根室半島沖地震波に対する壁体上部での加速度応答波形のパワー・スペクトルを図5に示す。これはステイブ・サイロ模型の場合で、入力加速度レベルの増大に伴う卓越振動数の推移を表わしたものである。なお、時間軸を1/8に圧縮した同地震波は8.0Hz、4.9Hzの卓越振動数成分のほか、16、25、32Hz付近の振動数成分を含む。模型内部が空の状態における卓越振動数は、約250galレベルで32Hz、約650galレベルで25Hz付近および8.0Hz、約1,000galレベルで8.0Hzと、入力加速度レベルの増大に伴って順次低振動数領域に移行している。また、内容物詰込み状態における卓越振動数も同様な傾向を示すが、約650galレベルで既に8.0Hz、4.9Hzまで低下しており、その低下傾向は模型内部が空の状態よりも著しい。他方、一体式壁体模型の応答加速度は、入力地震波の卓越振動数成分および正弦波20galの低加振レベルにおける共振振動数成分が卓越していた。しかし、内容物の有無によらず、入力加速度レベルが増大しても、その卓越振動数には全く変化が見られなかった。

4.3 外壁を締付けるフープの動ひずみ応答性状

円筒状に積上げたステイブの集合体は外壁をリング状のフープで締付けて初めて、内圧や地震力に抵抗できる壁体構造となる。したがって、ステイブ・サイロにおいてフープは非常に重要な壁体構成要素である。図6は、ステイブ・サイロ模型の最上部に位置するフープの円周方向動ひずみ分布を表わす。ステイブ・サイロ模型：[Empty]

これは根室半島沖地震波に対する入力加速度約1,000galレベルでの結果である。同図から模型内部が空の状態の方が、フープには大きなひずみが生じることがわかる。また、その模型状態における加振軸上のフープの動ひずみ(R1)および加振方向、加振直角方向加速度(A1、A2)の応答波形とパワー・スペクトルを図7に示す。フープの動ひずみは加振直角方向加速度と非常に類似した応答性状を示し、断面変形を伴う円周方向振動モードとの強い関連性を示唆している。これらの結果から、ステイブ・サイロ模型において模型内部が空の状態では、ステイブ継目のために壁体構造の剛性が低く、断面変形を伴う振動が励起さ

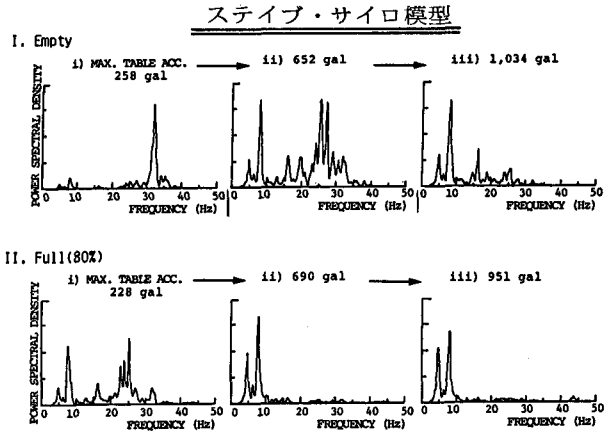


図5 入力加速度レベルの増大に伴う応答加速度の卓越振動数の推移(根室半島沖地震波)

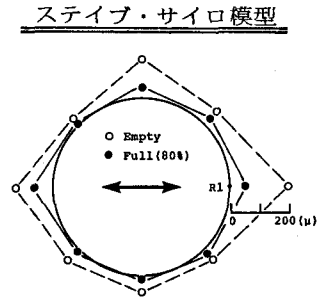


図6 模型最上部のフープ動ひずみの最大応答値分布(入力加速度約1,000galレベル)

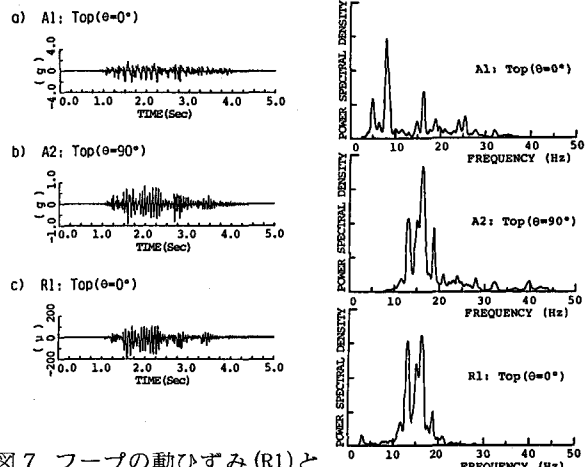


図7 フープの動ひずみ(R1)と加速度の応答性状(入力加速度約1,000galレベル)

れたことにより、フープにより大きなひずみが生じたと解釈される。

4.4 地震波応答時の復元力特性

構造物の実測絶対加速度記録と数値積分から算出した相対変位記録を利用する方法²⁾により、地震波応答時の復元力曲線を求めてみた。図8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る。一体式壁体模型の復元力特性は内容物の有無によらず、入力加速度が約1,000galレベルになっても同図のように線形であり、前述した地震波応答倍率がほぼ一定値であること、応答加速度の卓越振動数が変化しないことが理解できる。これに比べ、ステープ・サイロ模型の復元力特性をみると、模型内部が空の状態では約1,000galレベルで履歴性状を示すことがわかる。また、内容物詰込み状態では約650galレベルから既に紡錘型の履歴復元力特性を示しており、さらに約1,000galレベルになると、応答振幅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が顕著に現れることがわかる。

これらの結果から、入力加速度レベルの増大に伴って応答倍率が低下するというステープ・サイロ模型の非線形な地震応答性状は、ステープ継目を有する壁体構造自体あるいは内容物を含めた履歴減衰によることが明らかとなった。また、各模型状態および各入力加速度レベルにおける履歴曲線の勾配から求めた固有振動数は、図5に示した応答加速度の卓越振動数にそれぞれ一致しており、入力加速度レベルの増大に伴う卓越振動数の低振動数領域への移行も、壁体構造自体あるいは内容物を含めた軟化バネ型の復元力特性から説明が可能である。

5. あとがき

ステープ・サイロ模型および一体式壁体模型による振動実験結果の比較・考察を通じて、不連続な壁体構造を持つステープ・サイロの地震時の非線形応答性状・履歴復元力特性と内容物の影響に関する幾つかの知見が得られた。今後は、内容物内部の挙動や壁体(ステープ)の動ひずみ、内容物による動壁圧などに関する実験結果についても解析・検討を進めていきたい。

参考文献

- 1) 芳村 仁, 佐々木康彦: コンクリートステープ・サイロの地震時挙動に関する実験的研究, 第7回日本地震工学シンポジウム講演集, pp.1225-1230, 1986.
- 2) Iemura, H. and P.C. Jennings: Hysteretic

Response of a Nine-storey Reinforced Concrete

Building, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.3, pp.183-201, 1974.

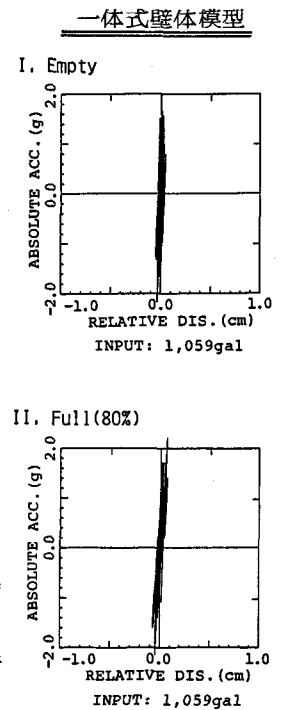
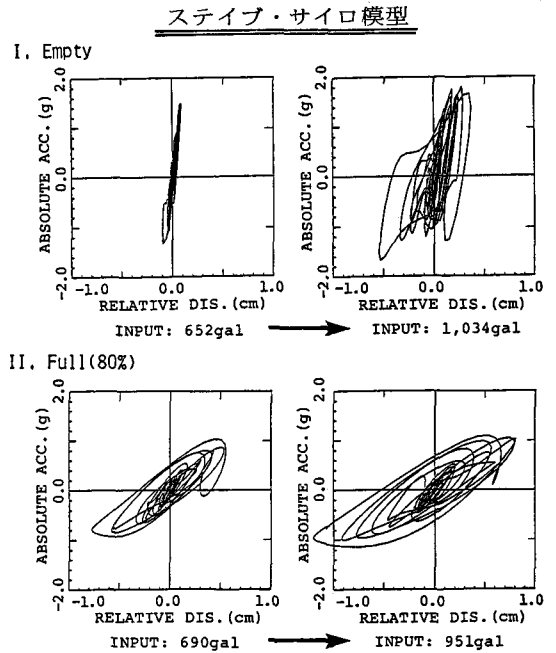


図8 地震波応答時復元力曲線の比較(根室半島沖地震波)