

I — 19 不連続壁体構造を有するステイブ・サイロの非線形地震応答性状

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
運輸省第四港湾建設局 酒 井 洋 一
北海道大学大学院 学生員 山 本 広 祐

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”が、工業用・農業用大型貯蔵施設として広く普及している。ただし、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。著者等は現在までに、大小二種類のステイブ・サイロ模型実験を通じて、このような不連続壁体構造の動的挙動と内容物の影響、静的・動的復元力特性に関する検討を進めてきた¹⁾。

本研究では、模型の高さと直径の比を2.0から2.5に上げるとともに、模型用ステイブの小型化・実際の下端支持状態の再現化をはかり、実物サイロにより相似な縮尺1/8サイロ模型を設計・製作した。この新しいサイロ模型による正弦波加振実験・振動モード測定実験の後、模型内部が空の状態（壁体単独）および内容物詰込み状態とした二基の模型で、それぞれ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”を実施し、ステイブ・サイロの地震応答性状と内容物の影響に関する検討を行なった。

2. 縮尺1/8ステイブ・サイロ模型実験概要

模型実験では直径6.4m、壁体高さ15.9mの実物サイロを想定し、直径約0.8m、高さ約2.0m、幾何学的縮尺1/8のサイロ模型を製作した。模型の設計・振動実験の実施に際して、構造物の慣性力と復元力に関する相似則を適用している²⁾。模型用ステイブはモルタル製で、長さ15.2cm、幅5.0cm、厚さ2.0cm（重さ0.32kgf）、単位体積重量2.09gf/cm³、圧縮強度約380kgf/cm²である。ステイブ・サイロ模型は円周方向50個、高さ方向13段のステイブを円筒状に組立て、32本のフープ（4mm径の軟鋼線材）に

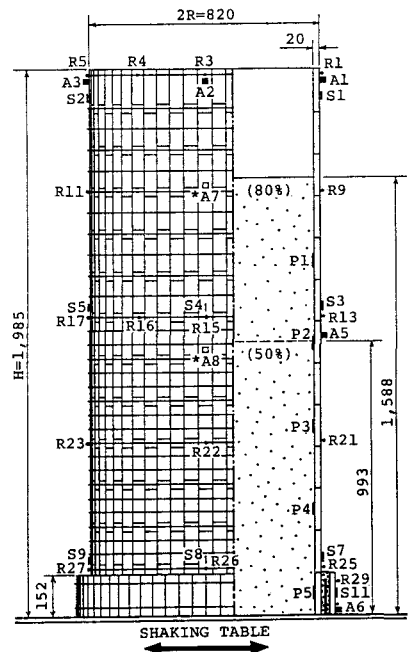


図1 縮尺1/8ステイブ・サイロ模型
および主要な計測位置

8.5kgf・cmのトルクを与えて外壁を締付けた。模型の下端は実際の支持状態を模擬して、水平振動台(2.5m×2.5m)上の鋼板に溶接した異形鉄筋をステイブで二重に囲み、間隙にモルタルを充填している。模型の寸法、ステイブ組合せ状態およびフープの締付け位置を図1に示す。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80%とした。

振動実験としては最初に、ステイブ・サイロの基本的振動特性に対する内容物の有無や詰込み量の影響を把握するため、模型内部が空の状態および内容物を50%、80%詰込んだ状態で、それぞれ正弦波加振実験および各共振点での円周方向・高さ方向振動モード測定実験を行なった。これらの実験結果については文献3)に詳述した。地震波加速度増大実験で使用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、日高山系地震(1970-1-21)の広尾でのEW成分および根室半島沖地震(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、相似則に従って時間軸は1/8に圧縮した。計測は壁体および内容物内部の加速度(A1~A6、*A7、*A8)8点、壁体(ステイブ)とフープの動ひずみ(S1~S11、R1~R30)41点、内容物による動壁圧(P1~P5)5点である。図1には略記号を用いて各計測量と計測位置を示してある。以下、地震波加速度増大実験から得られた主要な結果を述べる。

3. 地震波加速度増大実験結果および考察

3.1 地震波応答倍率と応答加速度の卓越振動数

入力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2に示す。それぞれ、根室半島沖・十勝沖地震波に対する模型内部が空の状態: [Empty]、内容物80%詰込み状態: [Full(80%)]での結果である。同図から、入力地震波の種類あるいは模型状態によらず、地震波応答倍率は入力加速度レベルの増大に伴って減少することがわかる。約100~250galの低入力加速度レベルでは応答倍率に比較的差異が見られるが、約650galレベルでは十勝沖地震波に対する内容物詰込み状態での1.7倍を除き、2.1~2.4倍の範囲にある。また、十勝沖地震波に対する内容物詰込み状態での応答倍率は、約650galレベルまで模型内部が空の状態でのそれを上回っており、「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ない実験結果も得られた。

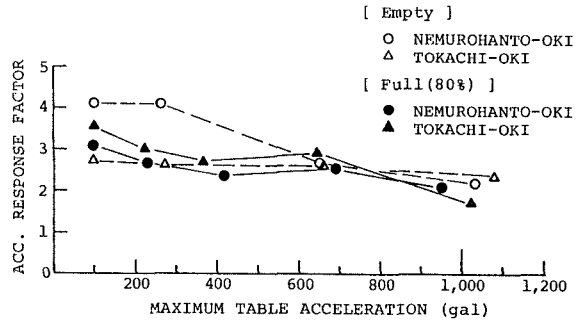
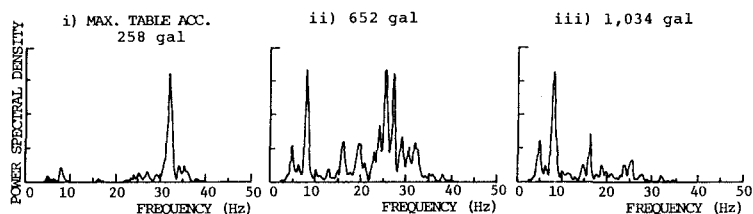


図2 入力加速度レベルの増大に伴う
地震波加速度応答倍率の推移
(根室半島沖 & 十勝沖地震波)

次に、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3に示す。これは、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まで低下している。正弦波 20 galの低加振レベルにおける共振振動数が、模型内部が空の状態では31 Hz、内容物詰込み状態で19Hzであったことを考慮すると³⁾、これらの結果から、入力加速度レベルの増大に伴って壁体の共振振動数が順次低下すること、その低下傾向は内容物詰込み状態の方が著しいことが推測される。

I. Empty



II. Full(80%)

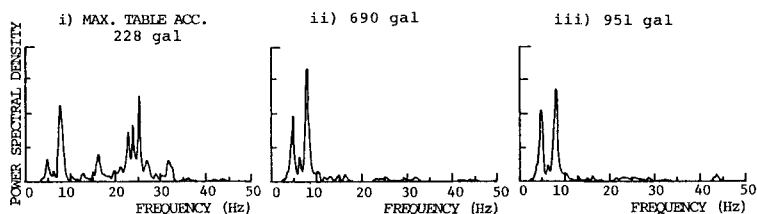


図3 地震波応答加速度の卓越振動数の、
入力加速度レベルの増大に伴う推移
(根室半島沖地震波)

3.2 地震波応答時の復元力特性

前節で得られた、入力加速度レベルの増大に伴って地震波応答倍率が低下し、応答加速度の卓越振動数が低振動数領域に移行するという実験結果は、壁体単独あるいは内容物詰込み状態での復元力特性の非線形性に起因すると考えられる。そこで、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⁴⁾により、地震波応答時の復元力曲線を求めてみた。

この方法は次式のように書き改められた1自由度系の運動方程式に基づいている。

$$F(x, \dot{x}) = -M[\ddot{x} + \ddot{z}] \quad (1)$$

ここで、 $F(x, \dot{x})$ は相対変位 x および相対速度 $\dot{x}$ の関数である全復元力、 M は振動質量、 $\ddot{z}$ は入力加速度である。上式から、全復元力は絶対加速度の逆符号に比例することがわかる。従って、絶対加速度と相対変位との同一時刻における値を直交軸上にプロットすることで、擬似的な復元力曲線が再現できるとしている。また、このようにして描いた復元力曲線の勾配は、構造物の剛性を質量で割ったものに相当し、その固有円振動数の自乗にほぼ等しくなる。

図4は上述の方法で求めた、根室半島沖地震波の入力加速度約650galレベルと約1,000galレベルでの復元力曲線を、模型内部が空の状態および内容物詰込み状態で比較したものである。なお、これらの復元力曲線は絶対応答加速度の卓越振動数成分を考慮した上で、フィルターにより高振動数成分を除去してある。同図から、模型内部が空の状態での復元力特性について、入力加速度 約650galレベルではほぼ線形であるが、約1,000galレベルになると逆S字型の履歴特性を示すことがわかる。これに比べて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のは、壁体単独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・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3で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、壁体単独あるいは内容物を含めた非線形な復元力特性から説明が可能である。

4. あとがき

縮尺1/8サイロ模型および内容物として米を用いた地震波加速度増大実験から、不連続な壁体構造を持つステイブ・サイロの地震時の非線形応答特性・履歴復元力特性と内容物の影響に関するいくつかの結果が得られた。現在、内容物内部の挙動や壁体（ステイブ）の動ひずみ、外壁を締付けるフープの動ひずみ、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・検討を進めている。

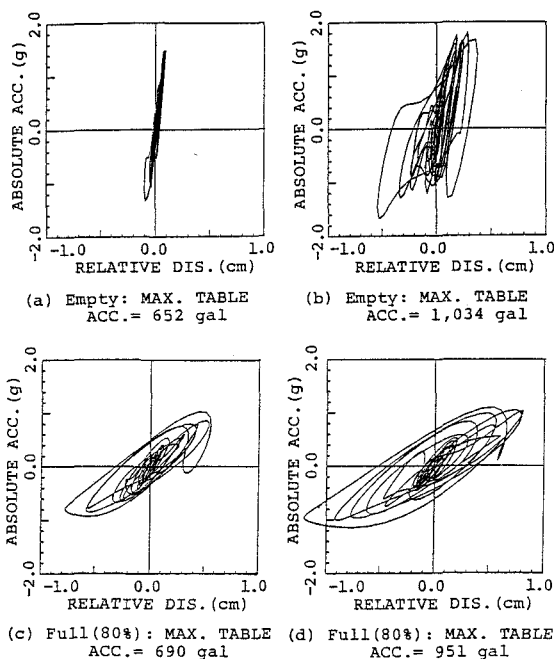


図4 模型状態・入力加速度レベルによる
地震波応答時の復元力曲線の比較
(根室半島沖地震波)

参考文献

- 1) Sasaki, Y. and J. Yoshimura: Dynamic Behavior of Concrete Stave Silos, Proc. 8th World Conf. on Earthquake Eng., Vol.6, pp.937-944, 1984.
- 2) 江守一郎, D. J. シューリング: 模型実験の理論と応用, 技報堂, 1972.
- 3) 芳村 仁, 佐々木康彦: コンクリートステイブ・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.
- 4) Iemura, H. and P.C. Jennings: Hysteretic Response of a Nine-storey Reinforced Concrete Building, Earthquake Eng. & Struct. Dyn., Vol.3, pp.183-201, 1974.