

## コンクリートステイ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

EXPERIMENTAL STUDIES OF SEISMIC RESPONSE BEHAVIOR OF CONCRETE STAVE SILOS  
AND EFFECTS OF THEIR STRUCTURAL DISCONTINUITY

佐々木康彦\* 芳村 仁\*\*

By Yasuhiko SASAKI and Jin YOSHIMURA

Concrete stave silos, which have been utilized as industrial and agricultural storage facilities, are cylindrically assembled from precast concrete blocks called "staves" and held together by exterior adjustable steel hoops. The purpose of this research was to clarify experimentally the seismic response behavior of concrete stave silos with such structural discontinuity.

A series of shaking table tests was performed using a 1/8-scale stave silo model and a cylindrical shell model. The effects of the joints of staves and of a stored material on the dynamic behavior are also investigated. The experimental results reveal that the hysteretic restoring force characteristics of concrete stave silos are caused by not only the damping effect of a stored material but also their structural discontinuity.

## 1. ま え が き

家畜飼料や食糧および鉱物資源の海外依存度が極めて高い我が国では、穀物・石炭などの大量貯蔵を目的とした大規模な鉄筋コンクリート製サイロあるいは鋼板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。このようなサイロ構造物は内容物として大量の粉粒体を貯蔵しているため、壁面に作用する静的圧力、内容物投入時の衝撃圧、排出時の流動現象や動的過大圧力<sup>1)</sup>のほか、地震時におけるサイロ壁体構造と内容物の動的相互作用など、通常の土木・建築構造物には見られない特殊な問題を抱えている。特に地震多発地帯である我が国ではサイロ構造物の合理的な耐震設計をめざして、主に石炭サイロを対象とした各種模型振動実験が実施され、粉粒体貯蔵サイロの振動特性や地震時挙動に関する幾つかの研究成果が得られている<sup>2)~7)</sup>。

他方、欧米では70年来の使用実績を持つ“コンクリートステイブ・サイロ (concrete stave silos)”が、工業用・農業用大型貯蔵施設として広く普及している。このステイブ・サイロは、工場で大量に成型されたコンクリートブロック(ステイブ)を用いて、現場作業の簡易化・工期短縮をはかった経済的で施工

\* 工修 北海道大学助手 工学部土木工学科 (〒060 札幌市北区北13条西6丁目)

\*\* 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科 (〒060 札幌市北区北13条西6丁目)

性に優れたサイロであり、欧米各国ではその設計・施工規準も制定されている<sup>9)~10)</sup>。しかし、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)で締付けるという不連続な壁体構造を持つため、その動的挙動や耐震安全性に関しては解明すべき点も多く残されている。

本研究では、縮尺1/8ステイブ・サイロ模型および内容物としては実物の米を用いて、水平振動台による正弦波・地震波加振実験を実施し、不連続な壁体構造を持つステイブ・サイロの振動特性・地震応答特性および内容物の効果に関する検討を行なった。さらには、このステイブ・サイロ模型と同一材料・同一寸法の“円筒シェル模型”による同様な振動実験を実施し、2つの模型振動実験結果の比較を通じて、ステイブ・サイロの地震応答特性における不連続構造の影響についても検討を加えた。

## 2. サイロ模型振動実験の概要

### (1) 模型振動実験における相似則

実際の構造物に生じる物理的現象を模型で再現するためには、相似模型の設計、模型実験の実施に際して相似則を考慮する必要がある<sup>11)</sup>。相似則を誘導する方法としては、次元解析を適用するパラメータ方式や現象を支配する微分方程式による方式などもあるが、ここでは現象を支配する物理法則を見定め、それらの法則から直接相似則を導き出す方式によった<sup>12)</sup>。

構造物の振動現象を支配する主要な物理法則としては、まず慣性力に関する「ニュートンの法則」と復元力(弾性力)に関する「フックの法則」を挙げ、構造物の慣性力と復元力の比を模型と原型とで等置して相似則を求める。さらには、構造材料や内容物の内部摩擦、ステイブ継目の摩擦などに起因する減衰力が重要となる。しかし、これらの減衰力を厳密に表現できる法則が不明であるため、相似則としては定式化できない。そこで、この模型振動実験においても本質的な減衰機構が再現されるように、模型材料は可能な限り実物と同種の材料を選択した。また、サイロ構造物における粉粒体の静的圧力や排出時の流動現象・動的過大圧力などを解明する場合は、自重の作用が支配的要因となる。しかし、本研究ではサイロ構造物の水平動特性に着目しており、相似則の誘導過程では重力の影響を無視している。

以上の諸条件から表1のように、ステイブ・サイロ模型振動実験における各物理量の相似比を幾何学的相似比(縮尺) $L_r$ で表わすことができる。

表1 サイロ模型振動実験における相似比

Scaling Parameters		Scale Factors
Length	$L_r$	$\frac{L_r}{L_r} = 1/8$
Mass Density	$\rho_r$	Prototype Material
Modulus of Elasticity	$E_r$	$\frac{\rho_r=1, E_r=1}{\rho_r=1, E_r=1}$
Stress	$\sigma_r$	$E_r = 1$
Strain	$\epsilon_r$	1
Force	$F_r$	$E_r L_r^2 = L_r^2$
Time	$t_r$	$(E/\rho)_r^{-1/2} L_r = L_r$
Frequency	$\omega_r$	$(E/\rho)_r^{1/2} L_r^{-1} = L_r^{-1}$
Displacement	$\delta_r$	$L_r$
Velocity	$v_r$	$(E/\rho)_r^{1/2} = 1$
Gravitational Acceleration	$g_r$	neglected
Acceleration	$a_r$	$(E/\rho)_r L_r^{-1} = L_r^{-1}$

(2) 縮尺1/8ステイブ・サイロ模型および円筒シェル模型

模型振動実験では直径6.4m、壁体高16.0m程度の実物ステイブ・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。模型用ステイブはモルタル製であり、長さ15.2cm、幅5.0cm、厚さ2.0cm（重さ0.32kgf）、単位体積重量2.09gf/cm<sup>3</sup>、圧縮強度約380kgf/cm<sup>2</sup>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、外壁を32本のフープ(4mm径の軟鋼線材)で締付けた。なお、フープに導入するトルク 8.5kgf・cmは、実物の設計値に基づいて相似則から算定した。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固定した。模型寸法、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。内容物は「米(単位容積重量0.70~0.75gf/cm<sup>3</sup>)」を使用し、詰め込み深さは模型高さの50%、80%の二段階とした。

不連続構造の影響を検討するために製作した“円筒シェル模型”の形状・寸法を図2に示す。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/cm<sup>3</sup>、圧縮強度約470kgf/cm<sup>2</sup>である。製作精度の限界から外径・壁厚に幾分相違が見られるが、ステイブ・サイロ模型とはほぼ同一寸法とした。また、この模型もサイロ模型と同様に、32本のフープを用いて外壁を締付けてある。さらには、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、この円筒シェル模型とステイブ・サイロ模型との主要な構造上の相違点は「壁体継目(ステイブ継目)」の有無となる。

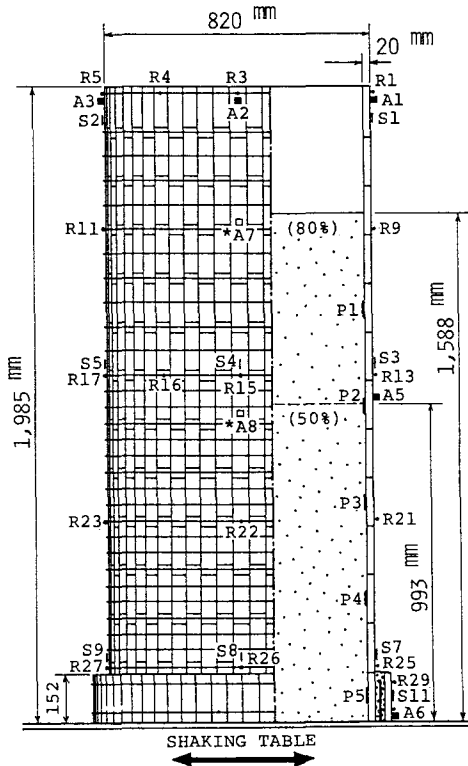


図1 縮尺1/8ステイブ・サイロ模型と変換器の配置状況

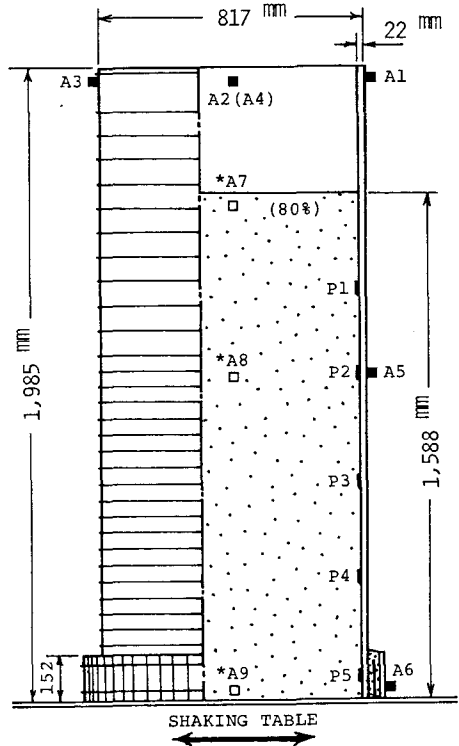


図2 円筒シェル模型と変換器の配置状況

### (3) 振動実験方法と振動台入力地震波

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と内容物の効果を把握するため、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。次に、入力加速度レベルの増大に伴う地震応答性状の推移を把握するために、以下のような地震波加振実験を実施した。この実験では二種類の地震波を交互に用いて、その最大加速度レベルを段階的に増大させながら、模型内部が空の状態および内容物80%詰込み状態のステイブ・サイロ模型を加振した。円筒シェル模型についても、模型内部が空の状態および内容物80%詰込み状態で、同様な正弦波・地震波加振実験を実施した。

この模型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成分および根室半島沖地震(1973-6-17)の厚岸での厚岸大橋近傍地盤で得た橋軸直角方向成分の加速度記録である。これら二種類の入力地震波の時刻歴波形を図3に示す。ただし、実験では相似則に従って、時間軸を1/8に圧縮した波形を用いた。また、この模型実験では壁体外壁と内容物表面・内部の加速度(A1~A6、\*A7、\*A8)計8点、壁体(ステイブ)とフープの動ひずみ(S1~S11、R1~R30)計41点、内容物による動壁圧(P1~P5)計5点の計測を行なった。各計測量とその測定位置は略記号を用いて図1に示す。

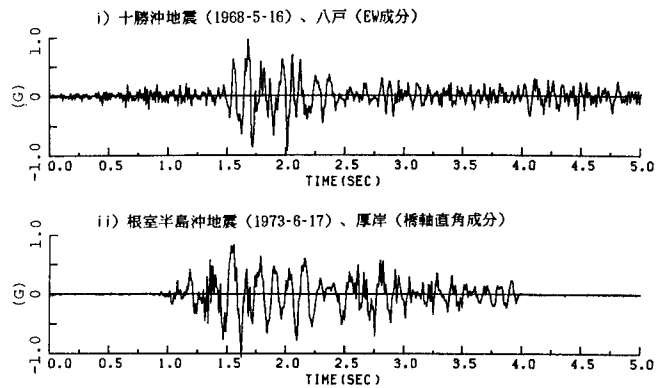


図3 入力地震波の時刻歴波形 [ 時間軸1/8圧縮 ]

## 3. 正弦波加振実験結果および考察

### (1) 基本的振動特性の比較と内容物の効果

正弦波定常加振(振幅20gal)に対す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)と円筒シェル模型(SHELL)とで比較した結果を図4に示す。ステイブ・サイロ模型については、模型内部が空の状態(壁体単独): [ Empty ] での共振振動数が31Hzにあり、23Hzにも小さなピークが見られる。これらの共振点における壁体の円周方向振動モードは、円筒シェル理論における円周方向波数 $n$ で表わすと、31Hzでは $n=1$ にほぼ相当する「円形モード」、同様に23Hzでは $n=2$ に相当する「楕円形モード」であった。また、いずれの共振点でも高さ方向は1次の振動モードであった。これらに比べて内容物80%詰込み状態: [ Full (80%) ] では、円形振動モードに対応する共振振動数が19Hzに低下すること、さらに加振振動数が60Hzまでの範囲内では楕円形振動モードは生じないことがわかった。他方、円筒シェル模型については内容物の有無によらず、いずれの共振点においても円周方向が円形モード、高さ方向が1次の振動モードであった。

円周方向円形振動モードに対応する共振振動数を比較すると、模型内部が空の状態では円筒シェル模型での46Hzに対して、ステイブ・サイロ模型では31Hzとなり、ステイブ継目によって壁体構造の剛性が低下していることがわかる。また、ステイブ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。他方、内容物詰込み状態では内容物の質量効果により、両模型ともに模型内部が空の状態に比べて、その

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%、円筒シェル模型では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。

(2) フープの動ひずみと

円周方向振動モードの関連性

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を用いて締付けることで初めて、内容物による壁面圧力や地震力に抵抗できる壁体構造となる。したがって、コンクリートステイブ・サイロにおいてフープは非常に重要な役割を担っている。このようなフープに生じる軸方向動ひずみに関して、正弦波加振実験で得られた特徴的な結果を以下に示す。

正弦波定常加振(振幅20gal)に対する模型上部での加速度(A1)およびほぼ同一位置でのフープ動ひずみ(R1)の共振曲線を図5に示す。これは模型内部が空の状態: [ Empty ] での結果である。壁体の加速度応答倍率は31Hzで最大となり、23Hzにも小さなピークが見られた。また、これらの共振点に対応する壁体の円周方向振動モードは、前述のように31Hzで「円形モード」、23Hzでは「楕円形モード」であった。これに比べて、フープの動ひずみ応答値は微小加振レベルなのでひずみ値自体は小さいが、円形モードに対応する31Hzではなく、楕円形モードに対応する23Hzで最大値を示している。これらの実験結果から、外壁を締付けるリング状のフープの動ひずみは壁体の加速度応答値の大小よりも、断面変形を伴う円周方向振動モードと関連性が強いことがわかる。なお、内容物詰込み状態では模型上部・中央部・下部という高さ方向の締付け位置によらず、フープの動ひずみは最大でも2~3μであり、この加振レベルでは殆どひずみが生じなかった。前述のように、この内容物詰込み状態では楕円形モードが生じていなかったことを考慮すると、この実験結果もフープの動ひずみと円周方向振動モードとの関連性を裏付けるものと推測される。

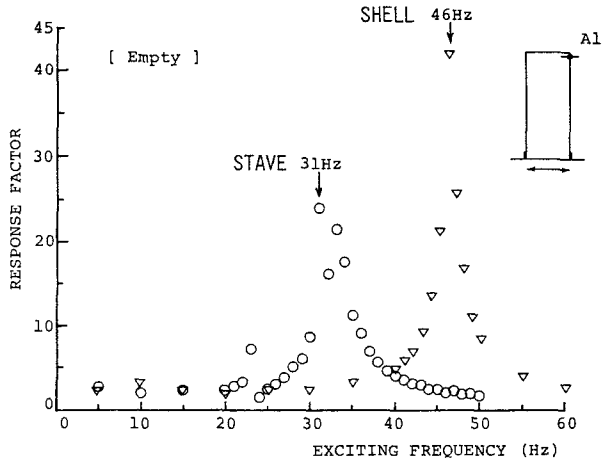
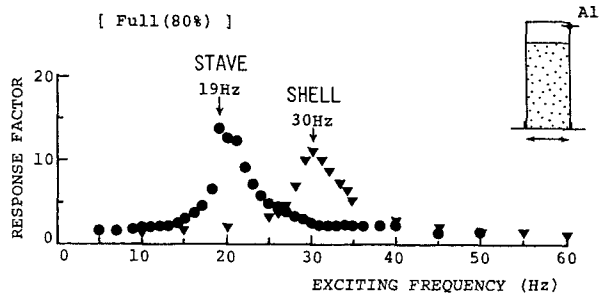


図4 模型上部での加速度共振曲線の比較

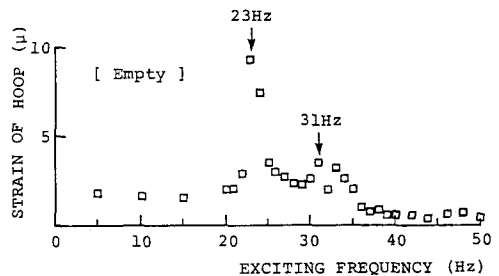
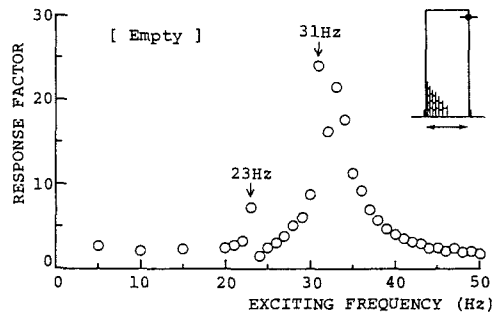


図5 加速度(A1)およびフープの動ひずみ(R1)の共振曲線 [ 模型内部が空の状態 ]

#### 4. 地震波加振実験結果および考察

##### (1) 地震波応答倍率の

##### 推移傾向の比較と内容物の効果

入力地震波の最大加速度レベルの増大に伴う、模型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)の推移傾向を図6に比較して示す。全体的な推移傾向を巨視的にみると、円筒シェル模型の場合は、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、応答倍率が1.8~2.6倍の範囲でほぼ一定値となっている。これに対してステイブ・サイロ模型の場合は、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、非線形な地震応答特性を示していることが特徴的である。

内容物の有無による地震波応答倍率値の大小関係を比較すると、根室半島沖地震波に対するステイブ・サイロ模型の応答倍率は入力加速度レベルによらず、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。この実験結果は入力地震波の卓越振動数と内容物の有無による模型の共振振動数との相互関係によるもので、「内容物が減衰効果として作用するため、壁体内部が空の状態に比べて内容物詰込み状態では必ず応答量が減少する」とは断定できないことがわかる。

##### (2) 応答加速度の卓越

##### 振動数の推移傾向の比較

根室半島沖地震波に対する模型上部での加速度応答波形のパワースペクトルを図7に示す。これはステイブ・サイロ模型の結果であり、それぞれ約250gal、約650gal、約1,000galと呼ぶ、三段階の入力加速度レベルに対するもので、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す。なお、時間軸を1/8に圧縮した根室半島沖地震波は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。

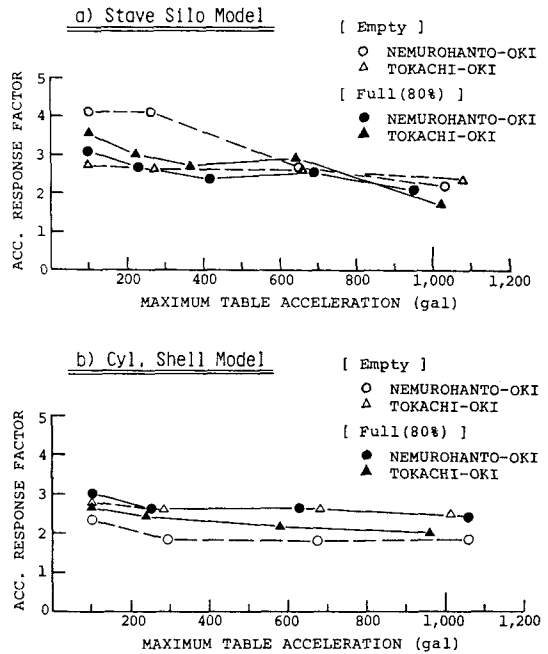


図6 入力加速度レベルの増大に伴う地震波応答倍率の推移の比較  
[ 十勝沖および根室半島沖地震波 ]

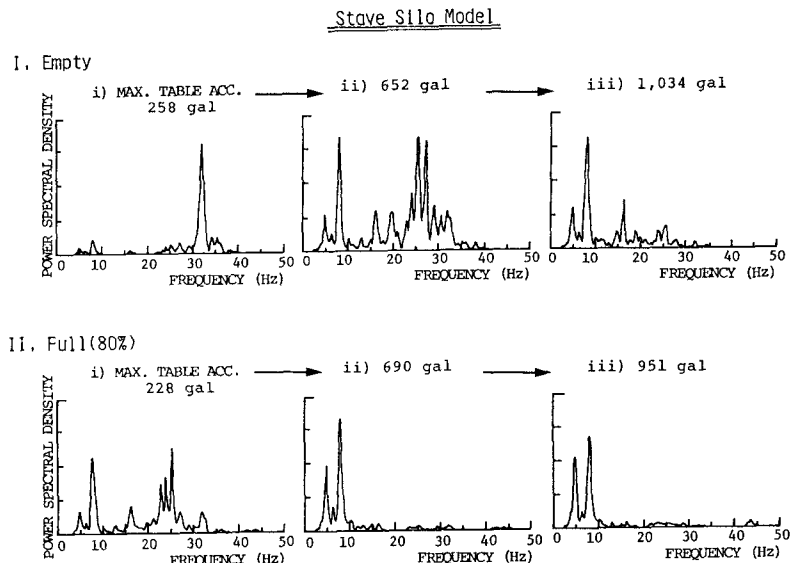


図7 入力加速度レベルの増大に伴う卓越振動数の推移  
[ 根室半島沖地震波 ]

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、円筒シェル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。

### (3) 地震応答時の復元力特性と不連続構造の影響

構造物の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<sup>13)</sup>により、地震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、ステイブ・サイロ模型と円筒シェル模型とで比較したものである。円筒シェル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ほぼ線形な応答性状を示し、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。これに比べて、ステイブ・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レベルからすで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ている。

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減少するというステイブ・サイロ模型の非線形な地震応答特性は、ステイブ継目を有する不連続な壁体構造自体あるいは内容物を含めた壁体構造系の持つ履歴減衰に起因することが推測される。また、模型内部が空の状態および内容物詰込み状態における各入力加速度レベルでの履歴曲線の勾配から求めた固有振動数は、図7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、不連続な壁体構造自体あるいは内容物を含めた壁体構造系の持つ、前述のような軟化バネ型の復元力特性から説明できるものと考えられる。

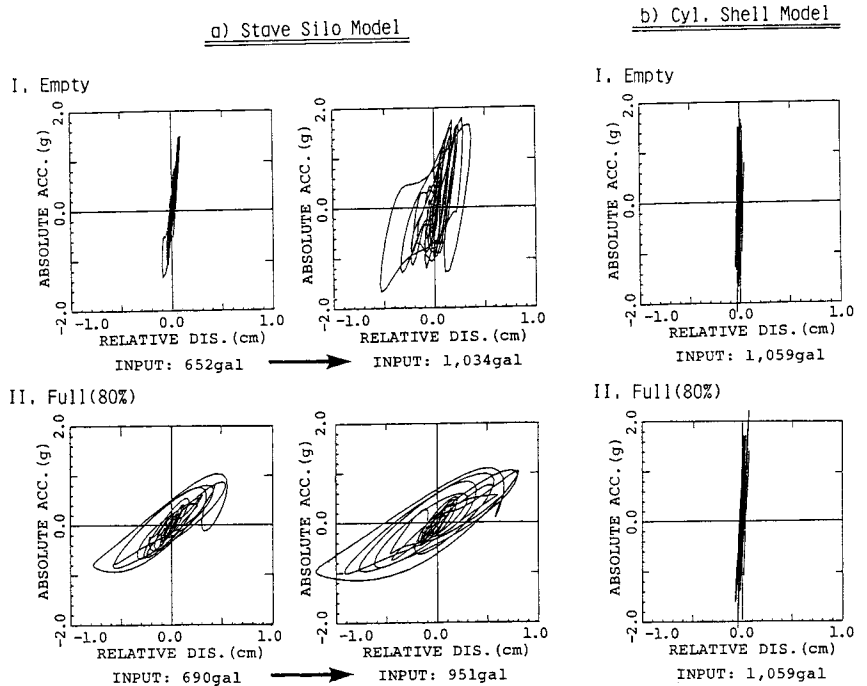


図8 地震応答時の復元力曲線の比較 [ 根室半島沖地震波 ]

(4) 外壁を締付けるフープの動ひずみ応答特性

コンクリートステイブ・サイロの壁体構造において、外壁を締付けるリング状のフープが非常に重要な構成要素であることは前述したとおりである。地震波加振実験から、このようなフープの動ひずみに関する地震応答性状のひとつとして、以下のような最大応答値の高さ方向分布性状が得られた。模型内部が空の状態では地震波の種類によらず、模型下部から上部に向かうにしたがって動ひずみが増大し、入力加速度約1,000galレベルの十勝沖・根室半島沖地震波に対して、最上部に位置するフープの動ひずみはそれぞれ約140 $\mu$ 、約200 $\mu$ という最大応答値を示した。他方、内容物詰込み状態では模型下端から模型高さの約1/4の距離に位置するフープで最大値を示したが、その値は前述の加振条件に対応して、それぞれ約130 $\mu$ 、約150 $\mu$ であり、模型最上部に位置するフープの動ひずみよりも小さめの応答値であった。したがって、以下ではさらに模型最上部に位置する動ひずみの地震応答性状に関する特徴的な結果を検討する。

ステイブ・サイロ模型の最上部に位置するフープの最大動ひずみ応答値の円周方向分布性状を図9に示す。この図は根室半島沖地震波に対する、入力加速度 約1,000 gal レベルでの2つの模型状態による比較である。同図から、加振軸および加振直角軸上に位置するフープの動ひずみが顕著であること、また模型内部が空の状態の方がフープにはより大きな動ひずみが生じることがわかる。さらに、模型内部が空の状態における加振軸上のフープの

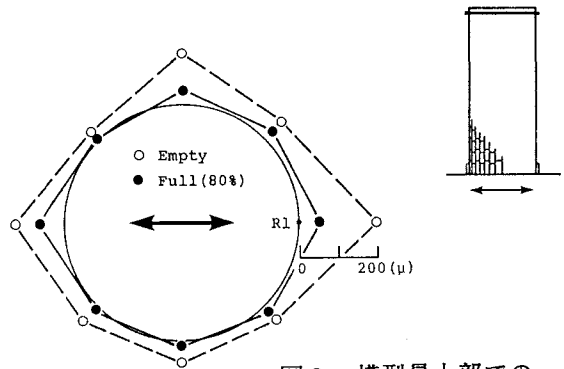


図9 模型最上部でのフープの最大動ひずみ応答値分布の比較

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10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、前述の正弦波加振実験結果と同様に、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れたことにより、外壁を締付けるフープには内容物詰込み状態よりも大きな動ひずみが生じたと解釈される。

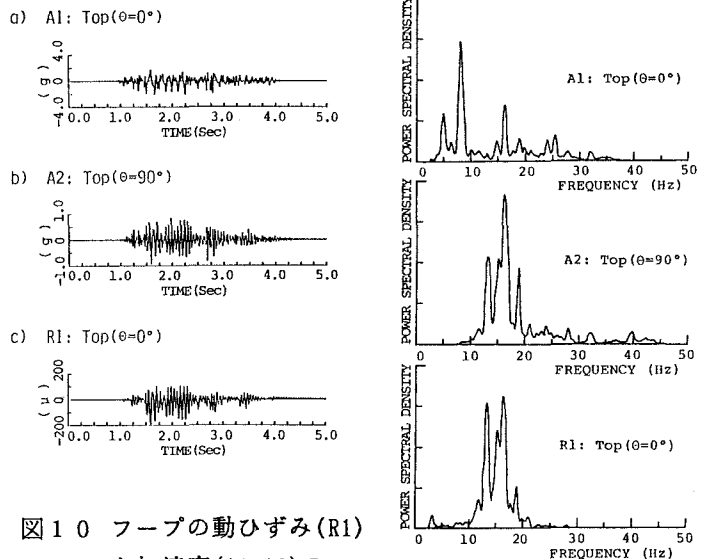


図10 フープの動ひずみ(R1)と加速度(A1, A2)の応答波形・パワースペクトル [ 模型内部が空の状態 ]



## 5. ま と め

不連続な壁体構造を持つコンクリートステイブ・サイロの振動特性・地震応答特性および不連続構造の影響や内容物の効果を検討するため、縮尺1/8ステイブ・サイロ模型および円筒シェル模型を用いて、水平振動台による正弦波・地震波加振実験を実施した。得られた主要な実験結果を以下に要約する。

- (1) 内容物詰込み状態でのステイブ・サイロ模型の共振振動数は、模型内部が空の状態に比べると著しく低下し、内容物の質量効果が顕著である。また、共振点での応答倍率も内容物の減衰効果で激減する。しかし、地震波加振の場合は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、内容物の減衰効果により必ず応答倍率が減少するとは断定できない。
- (2) ステイブ・サイロ模型と円筒シェル模型との共振振動数の比較から、ステイブ継目による壁体構造の剛性低下が示される。また、ステイブ・サイロの不連続な壁体構造は履歴復元力特性を持ち、この特性に起因して、入力加速度レベルの増大に伴ってステイブ・サイロ模型は応答倍率が減少し、応答加速度の卓越振動数が順次低下するという非線形な地震応答特性を示す。
- (3) 模型最上部に位置するフープの軸方向動ひずみは、断面変形を伴う円周方向振動モードと強い関連性を持つ。そのため、模型内部が空の状態の方がステイブ継目の影響で壁体構造の剛性が低く、地震波加振時には断面変形を伴う振動が励起され易く、外壁を締付けるフープには内容物詰込み状態よりも大きな動ひずみが生じる。

## 参 考 文 献

- 1) 杉田 稔：貯槽における粉体圧 ー大型貯槽の設計上の問題点ー，化学工学，Vol. 37，No. 8，pp. 757-763，1973.
- 2) 森 翠・坂井藤一・門屋大二・迫田治行：粒状物サイロの模型振動実験，川崎技報，No. 69，pp. 58-64，1979.
- 3) 河添 斉・堀越静視・本橋章平・内藤幸雄・前田祥三：石炭サイロ模型の振動台実験とその解析，第6回日本地震工学シンポジウム講演集，pp. 961-968，1982.
- 4) Yokota, H., Sugita, M. and Mita, A. : Vibration tests and analyses of coal-silo model, Proceedings of the Second International Conference on Design of Silos for Strength and Flow, Vol. 1, pp. 107-116, 1983.
- 5) 表 佑太郎・此上典文・茶谷文雄・鈴木哲夫：石炭サイロの動的挙動に関する基礎的研究，大林組技術研究所報，No. 26，pp. 15-22，1983.
- 6) 坂井正美・松村弘道・佐々木昌克・中村信行・小林迪也・北川雄二：石炭サイロの開発ー軀体構造の耐震性ー，日本鋼管技報，No. 103，pp. 36-47，1984.
- 7) 島本 明・児玉道正・山村正明：粉・粒状物サイロの動的有効質量に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文報告集，No. 379，pp. 79-90，1987.
- 8) ACI Committee 313: Recommended practice for design and construction of concrete bins, silos, and bunkers for storing granular materials (ACI 313-77) and commentary (Revised 1983), American Concrete Institute, 1983.

- 9) NSA Committee: Design standards for concrete stave farm silos, National Silo Association, 1974.
- 10) The Farm and Horticultural Building Industry Standards Committee: Specification for cylindrical forage tower silos and recommendations for their use (BS 5061), British Standards Institution, 1974.
- 11) Krawinkler, H. and Moncarz, P. D. : Similitude requirements for dynamic models, Dynamic Modeling of Concrete Structures (ACI Publication SP-73), pp.1-22, 1982.
- 12) 江守一郎・D.J. シューリング: 模型実験の理論と応用, 技報堂出版, 1972.
- 13) 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.

(1989年10月2日受付)