



Title	大型振動台によるコンクリートステイブ・サイロの動的挙動および履歴復元力特性に関する研究
Author(s)	佐々木, 康彦; Sasaki, Yasuhiko; 芳村, 仁 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 118, 1-11
Issue Date	1984-02-07
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/41838">https://hdl.handle.net/2115/41838</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	118_1-12.pdf



## 大型振動台によるコンクリートステイブ・サイロの 動的挙動および履歴復元力特性に関する研究

佐々木 康彦 芳村 仁  
(昭和58年 9月30日受理)

### Dynamic Behavior and Hysteretic Characteristics of Concrete Stave Silos

Yasuhiko SASAKI and Jin YOSHIMURA  
(Received September 30, 1983)

#### Abstract

Concrete stave silos have been utilized as industrial and agricultural storage structures in the U.S.A. and Canada for the past fifty years. The cylindrical walls of these silos are assembled from precast concrete units called "staves" and held together by exterior adjustable steel hoops. It is, therefore, necessary to investigate the earthquake resistance of stave silos with such discontinuous walls in Japan, one of high seismic regions.

The dynamic behavior of stave silos has been studied using a 1/6-scale model of actual silos. Brown rice and wet sawdust were used as the stored materials. A series of shaking table tests was conducted to investigate the vibration characteristics, the dynamic responses during earthquakes and the effect of stored materials. Earthquake resistance was also examined through the breaking test under earthquake wave excitations.

Furthermore, in order to clarify the static and dynamic restoring force characteristics of stave silos, static loading tests and vibration tests were performed using a stave silo wall model, which has an iron weight at top to simulate one degree of the freedom system. Nonlinear earthquake response analysis was also carried out and compared with the experimental results.

#### 1. ま え が き

近年、石炭などの鉱工業用原料・穀物・酪農飼料等の貯蔵を目的とした、各種大型貯蔵用サイロが数多く建設されている。なかでも、コンクリートステイブ・サイロは鋼製サイロ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工業用・農業用大型貯蔵施設として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<sup>1)</sup>。

ステイブ・サイロは、ステイ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（ステイブ）を組合せながら円筒状に積上げ、外壁を鉄筋（ロッド）で締付けるといふ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構造に比べて、壁体構造の動的挙動には不明な点が多く、地震多発地帯である我国ではステイブ・サイロの耐震安全性に関する検討が必要であると考えられる<sup>2-4)</sup>。

本研究は、不連続な壁体構造を持つステイブ・サイロの動的挙動の解明およびサイロ構造物の耐震設計に有用な基礎資料の集積を目的とし、2種類のステイブ・サイロ模型実験を実施したものである。縮尺1/6ステイブ・サイロ模型振動実験により、全体的な動的挙動と内容物の影響の解明および耐震性の検討を行なった。また、小型ステイブ・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から、この不連続壁体構造の復元力特性についても検討を加えた。

なお、振動実験は昭和53年2月末、開発科学実験所に導入された動電型振動試験装置（水平振動台）を使用して実施された。この振動試験装置は、各種土木・建築構造物を対象とし、地震時の動的応答特性および耐震性に関する実験的研究のために製作されたものである。

## 2. 縮尺1/6ステイブ・サイロ模型振動実験

### 2.1 サイロ模型および実験概要

(a) サイロ模型： 模型の設計・振動実験の実施に際し、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<sup>5)</sup>。この実験では、直径6.1m、壁体高12.2m、貯蔵量300tonの実物サイロを想定し、直径約1m、壁体高約2m、幾何学的縮尺1/6の模型を製作した。なお、半球状の屋根の重量および剛性は壁体に対して十分無視できるものであり、模型では屋根を取付けていない。模型用ステイブはモルタル製で、長さ26.5cm、幅8.0cm、厚さ2.2cmである。また、その上下両側面には円弧状の凹凸を付けてある。1個の重量1.1kg、単位体積重量 $2.38\text{g/cm}^3$ 、圧縮強度約 $340\text{kg/cm}^2$ である。ステイブ・サイロ模型は、最下段で1枚おきに約7cm短いステイブを用い、円周方向40個、高さ方向8段に組合せながら円筒状に積上げ、外壁をロッド15組で締付けて組立てた。模型の下端は、水平振動台にボルト結合した下端固定用鋼板の円形溝内に、モルタルを充填して固定した。模型の寸法、ステイブの組合せ状態およびロッドの締付け位置を図1に示す。ロッドは5mm径の軟鋼線を使い、壁体円周の両側からステイブを締付ける。締付け量は $33\text{kg}\cdot\text{cm}$ とした。

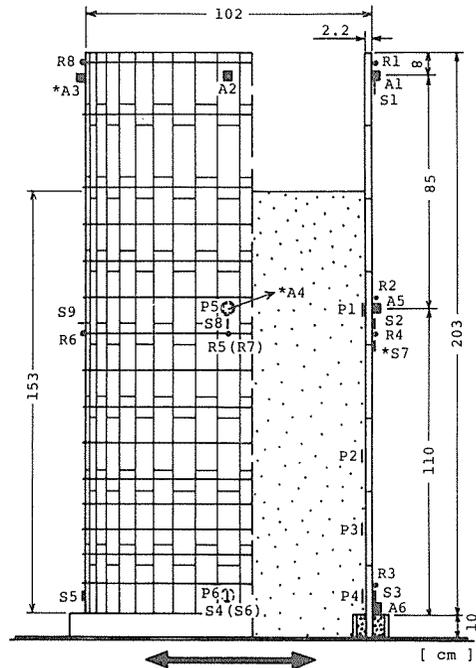


図1 縮尺1/6ステイブ・サイロ模型

模型内部に詰込む内容物は、穀物としては「玄米」と飼料を模擬して水分を含ませた「オガクズ」の2種類を使用した。単位重量（見掛けの単位容積重量）は、それぞれ0.85, 0.40g/cm<sup>3</sup>である。また、内容物の詰込み深さは153cm（壁体高さの約75%）、その容量は約1.2m<sup>3</sup>になる。サイロ模型の壁体重量は369kg、内容物は玄米が約1 ton、オガクズが約0.5 tonである。

(b)実験概要： 実験で使用した水平振動台（2.5m×2.5m、重量880kg）は4台の油圧ベアリングで支持され、振動発生機により水平1軸方向に加振される。加振方式は動電駆動方式であり、正弦波形、ランダム波形および地震波形による加振が可能である。振動試験装置の主な性能仕様を表1に示す。

表1 振動試験装置（振動台）の主な性能仕様

Item	Specification
1. Size of the table	2.5 m × 2.5 m
2. Max. load	10 ton (22,000 lb)
3. Max. driving force	
sinusoidal wave	2.5 ton · G (5,500 lb · G)
random wave	1.0 ton · G (2,200 lb · G)
4. Frequency range	0.1~100 Hz
5. Max. acceleration	2.8 G
(with 1 ton load)	1.3 G
6. Max. velocity	50 cm/sec (1.64 ft/sec)
7. Max. displacement	±50 mm (±2.0 in.)
8. Driving direction	one horizontal direction
9. Driving waves	Sinusoidal, random & earthquake waves

振動実験としては、玄米あるいはオガクズを詰込んだ模型状態および模型の内容物が空の状態それぞれ正弦波加振実験、地震波加振実験を実施した。さらに、玄米を詰込んだ模型状態で、加振振幅を漸増させた地震波による動的破壊実験も行なった。ここで使用した入力地震波形は、十勝沖地震（1968-5-16）の八戸で観測された加速度記録のEW成分、日高山系地震（1970-1-21）の広尾での加速度EW成分および根室半島沖地震（1973-6-17）の厚岸における厚岸大橋橋軸直角方向の成分である。実験では、相似則に従って時間軸を1/6に圧縮処理した波形を使用している。

計測は、壁体の加速度6点、壁体（ステイブ）とロッドの動ひずみ17点、内容物による動壁圧6点の合計29点および水平振動台の加速度・速度・変位3点である。各計測量と計測位置は略記号を用いて図1に示す。各計測量は200個/秒でAD変換され、デジタルデータ集録装置で磁気テープに集録された後、大型計算機で処理・解析される。

## 2.2 正弦波・地震波加振実験結果および考察

(a)振動特性と内容物の影響： サイロ構造物は壁体構造と内容物の連成振動系を成し、両者の動的相互作用のもとで、その振動特性を表わす。ここでは、壁体上部の応答加速度に着目して、ステイブ・サイロ模型の振動特性と内容物の影響を検討する。図2は振幅20gal一定とした正弦波加振による壁体上部の加速度共振曲線を表わす。玄米詰込み、オガクズ詰込みおよび内部が空という3種類の模型状態における実験結果を比較したものである。なお、同図では「玄米」あるいは「オガクズ」を詰込んだ模型状態をそれぞれ〔Full (BR)〕,〔Full (SD)〕, 内部が空の模型

状態を [ Empty ] と略記して各模型状態を区別している。以下の実験結果も同様である。

模型の内部が空の状態（壁体単独）では、32Hzに鋭いピークを示す共振点を持ち、その応答倍率は30.9倍となっている。また、22Hzにも小さなピークがある。これに比べて、玄米詰込み状態では共振振動数が21Hzまで低下し、応答倍率も約33%減少している。また、オガクズ詰込み状態では応答倍率が1/7以下に減少し、明確な共振点を示さなくなっている。このように、ステイブ・サイロの振動特性は内容物の有無で極端に変化する実験結果が得られた。また、同じ詰込み量でも玄米とオガクズでは、振動性状の相違が顕著に現われている。これは玄米が粒状体であるのに対してオガクズは粉状体に近く、内容物の種類や物性の相違によって、振動特性に対する内容物の影響の程度が著しく異なることを表わしている。なお、各模型状態での減衰性の指標として、応答倍率値から計算式を用いて減衰定数を求めると、Full (BR) 2.4% (21Hz)、Full (SD) 13.1% (22Hz) と11.8% (37Hz)、Empty 1.6% (32Hz) であった。

壁体の円周方向振動モードについて、模型の内部が空の状態では22Hzで楕円形に近い振動モードを示し、32Hzでは円形に加振直角方向の横揺れが加わったような振動モードであった。これに対して、玄米あるいはオガクズを詰込んだ模型状態ではほぼ円形モードとなる。なお、いずれの模型状態においても、高さ方向は1次の振動モードしか生じなかった。また、他の計測量についても、壁体下端の動ひずみ (S3) が加速度共振曲線と類似した傾向を示す、壁体上部におけるロッドの動ひずみ (R1) は円周方向振動モードと強い関連性を持つ等の実験結果が得られている<sup>6)</sup>。

#### (b) 地震波応答特性と内容物の影響：

玄米詰込み、オガクズ詰込みおよび内部が空の各模型状態で、それぞれ前述の3種類の地震波による加振実験を行なった。入力地震波の最大振幅はいずれの場合も約100galとした。以下、根室半島沖（厚岸）地震波に対する実験結果を示す。

図3は、根室半島沖地震波形および応答加速度波形の一例である。また、主な計測量の最大応答値を、3種類の模型状態で比較したものを表2に示す。ここで、A1、A2は壁体上部加振方向および加振

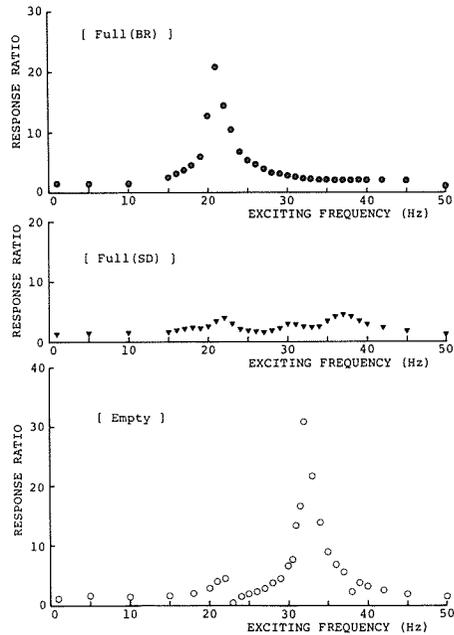


図2 模型状態による加速度共振曲線の比較

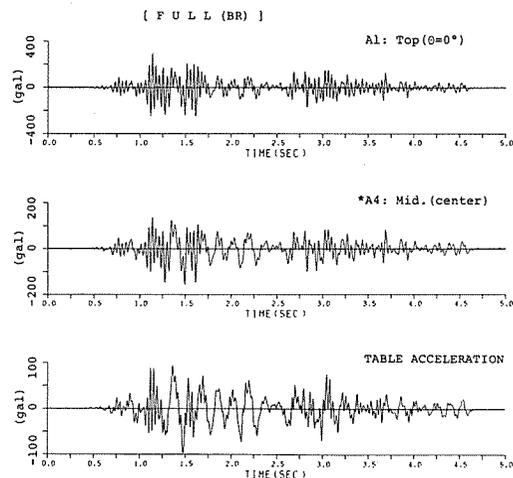


図3 入力地震波形および応答加速度波形  
(根室半島沖)

表2 地震波最大応答値 (根室半島沖)

MEASURED POINT	Full(BR)	Full(SD)	Empty
ACCELERATIONS (gal)			
A1 : Top ( $\theta = 0^\circ$ )	294	165	208
A2 : Top ( $\theta = 90^\circ$ )	45	41	74
A5 : Mid. ( $\theta = 0^\circ$ )	158	126	130
*A4 : Mid. (center)	159	389	
TABLE ACCELERATION	98	102	102
STRAINS OF STAVE ( $\mu$ )			
S3 : Bot. ( $\theta = 0^\circ$ )	3.9	1.4	1.1
*S7 : Mid. (joint)	17.2	9.5	6.2
STRAINS OF RODS ( $\mu$ )			
R1 : Top ( $\theta = 0^\circ$ )	3.3	8.1	8.2
R2 : Mid. ( $\theta = 0^\circ$ )	3.9	4.5	2.8
R3 : Bot. ( $\theta = 0^\circ$ )	1.4	1.1	1.2

直角方向の応答加速度，A5は壁体中央部の応答加速度である。\*A4は，A5と同一高さにおける内容物中心部の応答加速度を表わす。S3は壁体下端の動ひずみである。また，\*S7は壁体中央部のステイブ継目に接着したひずみゲージの応答量で，その値から継目の相対変位量は算定できないが，継目の挙動を表わすと考える。R1～R3は，それぞれ壁体上部・中央部・下部に位置するロッドの動ひずみである。

壁体上部での加速度の応答倍率は模型内部が空の状態では2.0倍である。これに対して，オガズ詰込み状態では1.6倍と低下するが，玄米詰込み状態では逆に3.0倍と増大している。この実験結果は，内容物が減衰効果として作用するため壁体の応答値は減少する，とは必ずしも言えないことを示している。同一高さでの壁体と内容物内部の応答加速度を比較すると，玄米詰込み状態では殆ど等しい応答値であるが，オガズ詰込み状態では内容物の方が3.1倍も大きな応答を示している。壁体の動ひずみは模型状態によらず，下端でも1～4 $\mu$ 程度であり，上部・中心部では殆どひずみが生じないことが特徴的であった。また，ロッドの動ひずみ値も全体的に微小である。

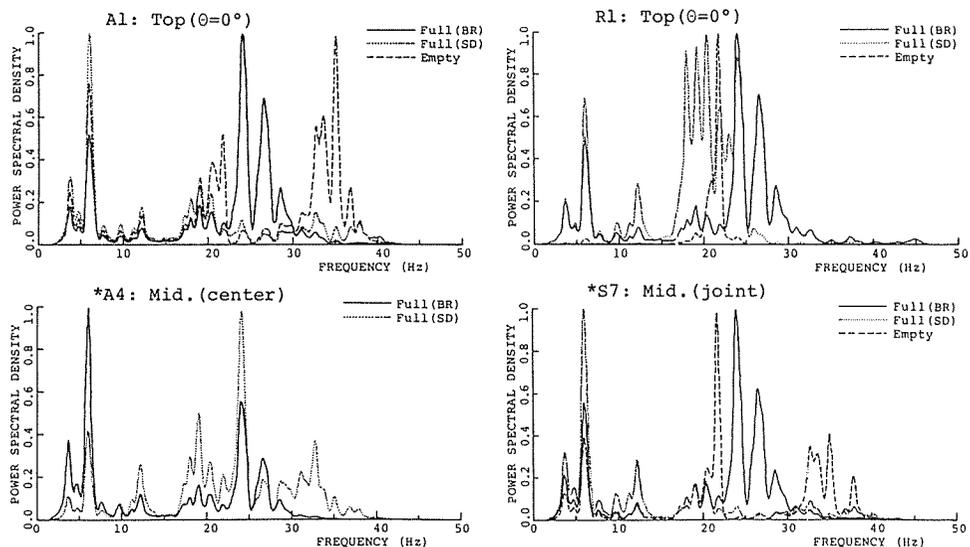


図4 地震波応答特性の比較 (根室半島沖)

地震波応答特性を振動数領域で検討するため、主な計測量のパワースペクトルを図4に示す。同図では、模型内部が空の場合を破線で、玄米詰込み・オガクズ詰込みの場合をそれぞれ実線・点線で表わす。また、模型状態による比較を容易にするため、縦軸のパワースペクトル密度は最大値を1.0に正規化している。なお、入力波である根室半島沖地震波は5.9, 3.7Hzに卓越振動数を持つ(時間軸1/6圧縮)。

内容物内部の挙動(\*A4)について、オガクズ詰込み状態では24.0Hz成分が卓越している。また、玄米詰込み状態では入力地震波の卓越振動数成分である5.9Hzのほか、24.0Hz, 26.4Hz成分にもピークがある。これに対して壁体上部の応答加速度(A1)は、玄米詰込み状態では内容物内部の挙動(\*A4)と類似した応答特性を示し、壁体と内容物が一体となって動いていることがわかる。しかし、オガクズ詰込み状態では前述の24.0Hz成分が殆どなく、地震波応答時に両者は異なった挙動を示す。これらの結果から、壁体と内容物の動的相互作用も内容物の種類によって相当異なることが予測される。壁体中央部におけるステイブ継目の挙動(\*S7)は模型状態に係わらず、壁体上部の応答加速度(A1)と非常に類似した応答特性である。この結果は、不連続壁体構造の応答と継目の挙動との強い関連性を示唆している。模型内部が空の状態での壁体上部に位置するロッドの動ひずみ(R1)は、正弦波加振実験で応答加速度が最大のピークを示した共振振動数32.0Hzではなく、22.0Hzに単一の振動数成分を持っている。この成分は楕円形に近い振動モードであった振動数に対応する。この結果は地震波応答時においても、ロッドの動ひずみは壁体の円周方向振動モードと強い関連性があることを示している。なお、壁体下端の動ひずみ(S3)は、壁体の応答特性に類似した振動数成分も含むが、入力地震波の卓越振動数成分が支配的であった。

### 2.3 動的破壊実験結果および考察

正弦波・地震波加振実験に引き続き、加振振幅の増加に伴う応答特性の推移の把握、この不連続壁体構造の破損状況・破壊過程の解明および耐震性の検討を目的とし、地震波による破壊実験を実施した。この実験は玄米詰込み模型状態で行なわれ、最大振幅を段階的に増加させた2種類の地震波が交互に入力された。入力最大加速度は、十勝沖地震が185, 261, 400gal, 根室半島沖地震が208, 308, 545galである。

表3 加振振幅の増加に伴う応答倍率の推移(根室半島沖)

MEASURED POINT	TABLE ACCELERATION (gal)			
	98	208	308	545
ACCELERATIONS (non-dimension)				
A1: Top ( $\theta=0^\circ$ )	3.00	2.82	2.21	1.97
A2: Top ( $\theta=90^\circ$ )	0.46	0.53	0.70	0.65
*A4: Mid. (center)	1.62	1.48	1.32	1.19
STRAINS OF STAVES (*1/100 $\cdot \mu$ /gal)				
S3: Bot. ( $\theta=0^\circ$ )	3.98	3.80	3.83	3.60
*S7: Mid. (joint)	17.6	12.4	10.8	10.9
STRAINS OF RODS (*1/100 $\cdot \mu$ /gal)				
R1: Top ( $\theta=0^\circ$ )	3.37	3.99	3.99	7.50
R2: Mid. ( $\theta=0^\circ$ )	4.39	4.23	4.12	4.07
R3: Bot. ( $\theta=0^\circ$ )	1.43	5.82	9.25	8.59

(a) 加振振幅の増加に伴う非線形応答特性と動壁圧分布性状： 根室半島沖地震波に対する主な計測量の応答倍率の推移を表3に示す。ここで、壁体およびロッドの動ひずみの応答倍率とは、それぞれの応答値を入力最大加速度で割った値である。壁体上部の加速度の応答倍率は、加振振幅の増加に伴って3.0倍から2.0倍まで漸次低下する傾向にあり、非線形な応答特性を示している。ステイブ継目や内容物内部の挙動も同様な傾向を示す。しかし、壁体下部に位置するロッドの動ひずみは逆に増加傾向を見せている。これらに比べて、壁体下端の動ひずみの応答倍率はほぼ一定となっている。この結果は、動ひずみ応答波形の卓越振動数成分が入力地震波と等しく、壁体上部の挙動に殆ど影響されていないためと思われる。

根室半島沖地震波に対する動壁圧の最大応答値分布の推移を図5に示す。同図には比較のため、玄米詰込みによる静壁圧分布も記入してある。この実験結果から、地震波応答時の動壁圧分布は、加振振幅の増加に伴って特異な性状になっていくことがわかる。しかし、どの場合も壁体下部で最大応答値を示す。また、加振振幅が300galを越えると、壁体中央部、下部での動壁圧値が静壁圧値と等しいかそれを上回ることがわかる。

(b) 地震波による破壊実験結果と耐震性： 十勝沖、根室半島沖地震波による破壊実験の結果、サイロ模型壁体の十数箇所に微小なひびわれが発生した。ひびわれは、加振方向から45度方向の両壁面下部に多く発生し、壁体中央部にも見られたが、上部には全く発生していない。また、ひびわれはステイブ水平継目の位置から発生するが、ひとつのステイブ内で留まり、それ以上は進展しないことが明らかになった。なお、発生したひびわれには注意深く観察しなければ発見できなかったものが多く、サイロ模型全体の動的挙動に影響を与えるほどではなかった。

この実験過程で、ステイブ・サイロ模型は一連の十勝沖、根室半島沖地震波を受けた。しかも、根室半島沖地震波の場合の入力加速度545galは相似則から算定すると震度階で震度5（強震）に相当する。しかし、微小なひびわれが生じたものの、外壁を締付けているロッドの破断、壁体の崩壊という致命的な現象は起こらなかった。この実験から、ステイブを組合せながら円筒状に積上げ、外壁をロッドで締付けるステイブ・サイロ壁体構造は十分な耐震性を持つことが明らかになった。

### 3. ステイブ・サイロ壁体構造の履歴復元力特性

コンクリートステイブ・サイロは、前述のようなステイブを組合せながら円筒状に積上げ、外壁をリング状のロッドで締付けた不連続な壁体構造である。ただし、個々のステイブはモルタル等で結合されておらず、ロッドの締付けによって円筒形状を維持している。したがって、地震時

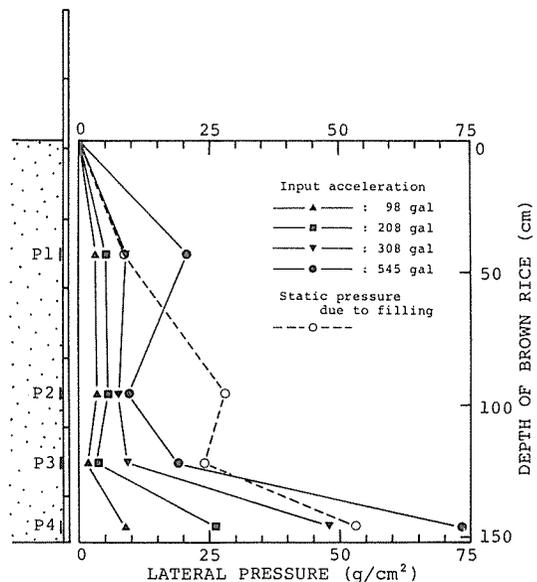


図5 動壁圧最大応答値分布（根室半島沖）

にはステイブ継目の動きを伴った動的挙動を示すと考えられる。この章では、小型ステイブ・サイロ壁体模型を用いた静的水平加力実験および地震波加振実験を通じて、静的および動的復元力特性の検討を行なった。また、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も検討を加えた。なお、ここでは壁体構造自体の復元力特性に着目しているため、実験は模型の内部が空の状態だけで行なわれた。

### 3.1 模型実験概要

ステイブ・サイロ型体模型は、モルタル製の模型用ステイブ（15.2 cm×5.0 cm，厚さ2.0 cm）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3 mm 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6に示す。ここでは，解析からも壁体構造の復元力特性を検討するために模型頂部に分銅（23.6 kg）を取付け，この壁体模型を1質点振動系として取扱った。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。

### 3.2 静的水平加力・地震波加振実験結果および考察

正負交番漸増荷重を模型頂部に加える静的水平加力実験から得られた，模型頂部における荷重-変位曲線（静的復元力特性）を図7に示す。なお，載荷過程での折返し変位量は $\pm 0.1$ ， $\pm 0.2$ ， $\pm 0.4$ ， $\pm 1.0$ ， $\pm 1.5$ ， $\pm 2.0$  mmである。この実験結果から，ステイブ・サイロの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バネ型であることが明らかになった。変位量が增大するに従って履歴ループの剛性勾配が漸次低下する傾向を示している。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量に対応して，それぞれ680，569，423，233，172，129，kg/cmであった。なお，この実験範囲での壁体のひずみは最大でも $30\mu$ 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もわかった。

3種類の地震波を用い，それぞれ約100gal，約250galの2段階の入力最大加速度レベルで加振した場合の，模型頂部における最大応答加速度とその応答倍率を表4に示す。同表からステイブ・サイロ壁体構造の地震波応答は，入力加速度の増加に伴って応答倍率が著しく減少する非線形応答特性を示すことがわかる。図8は入力最大加速度229galの根室半島沖地震波，実測絶対加速度および数値積分により求めた相対応答変位である。これらの記録から描いた地震波応答時の復元力曲線が図9で

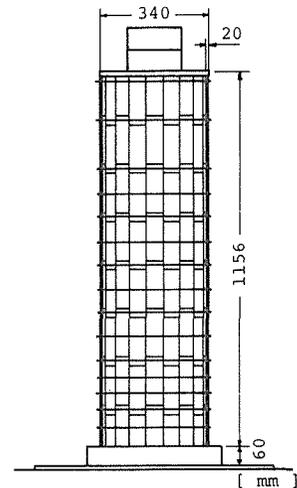


図6 ステイブ・サイロ壁体模型

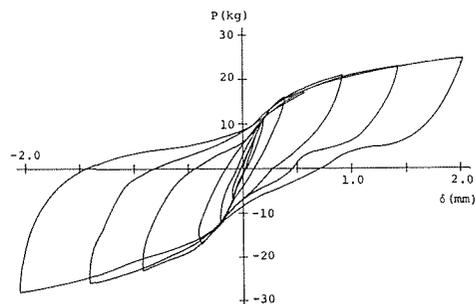


図7 模型頂部の荷重-変位特性  
(静的復元力特性)

表 4 地震波最大応答値および応答倍率

Type of Input Wave	Max. Table Accel. (gal)	Max. Response Accel. (gal)	Response Ratio
NEMUROHANTOU (Akkeshi)	96	273	2.84
	229	410	1.79
TOKACH-OKI (Hachinohe)	100	251	2.51
	259	443	1.71
HIDAKASANKEI (Hiroo)	92	304	3.30
	264	417	1.58

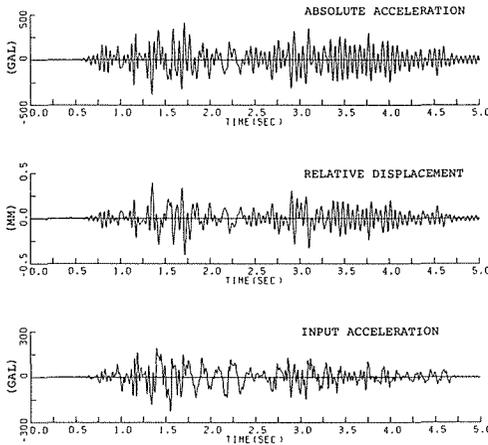


図 8 入力地震波形および応答波形 (根室半島沖, 229GAL)

ある。それぞれ応答初期 (0.60~0.90 sec), 最大応答時 (1.60~1.80 sec) および応答終期 (4.35~4.65 sec) の部分である。この結果から, 地震波応答時においても応答振幅の増加に伴って履歴ループの面積が増大し, 剛性勾配が低下する傾向の履歴復元力特性を示すことがわかる。また, その同一変位量に対する剛性勾配は静的復元力特性とほぼ等しい値であった。前述した非線形応答特性は, この壁体構造が持っている履歴復元力特性に起因すると考えられる。

3.3 1 質点履歴復元力モデルによる

非線形地震応答解析

(a) 1 質点履歴復元力モデル: 一般に, 非線形復元力特性を持つ 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。

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

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。

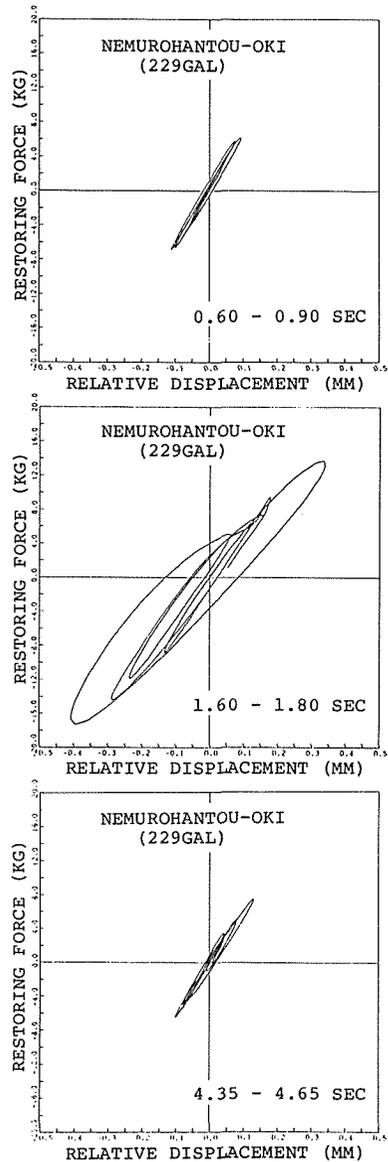


図 9 地震波応答時復元力特性 (根室半島沖, 229GAL)

本解析では動的復元力特性  $F(\dot{X}, X)$  として、静的水平加力実験から得られた静的復元力特性を使用した。すなわち、図7で示した荷重-変位曲線を多数の折線で近似して Poly-linear 系復元力特性とした。また、応答計算では振動量を 41.5kg としている。頂部に分銅を取付けたサイロ壁体模型が振動する場合、分銅重量 (23.6kg) 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 0.14 mm に対する復元力 9.14kg を等しいと置き、等価振動重量を 41.5kg と定めた。この値は壁体重量の 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。

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

ここで、 $\tilde{M}$ ：等価質量、 $X$ ：相対変位、 $\ddot{Z}$ ：入力速度、 $R(X)$ ：静的履歴復元力特性。

応答計算はルンゲ・クッター法を用い、時間間隔は 0.0025sec で行なった。また、地震応答過程の履歴制御は、上界・下界曲線および骨格曲線を用いた復元力制御法と速度制御法によった<sup>7),8)</sup>。

(b) 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結果を、実験結果と比較して図10(a), (b) に示す。これらは模型頂部における応答加速度である。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。また、参考のため同図(c)に線形応答解析結果を示した。線形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、減衰定数は加速度共振曲線から求めた 6% である。その最大応答値は実験値と比べて 42.2% も大きめであり、最大値の発生時刻も異なっていることがわかる。図 11 は、十勝沖地震波 (入力最大加速度 259gal) に対する解析結果と実験結果との比較である。この場合も最大応答値の相対誤差は 4.5% 程度であり、両者は良く一致している。これらの結果から、地震応答解析における動的復元力特性に静的水平加力実験で得られた静的復元力特性が適用できることがわかる。また、このことからステイブ・サイロ壁体構造の履歴復元力特性は履歴を描く速度に殆ど依存しないと考えられる。以上の 1 質点解析モデルの抵抗力特性には、応答速度の関数とした減衰力 (たとえば粘性減衰力など) を考慮していない。しかし、応答速度の関数である減衰力を考慮しない方がより実験値に近いという結果も得ら

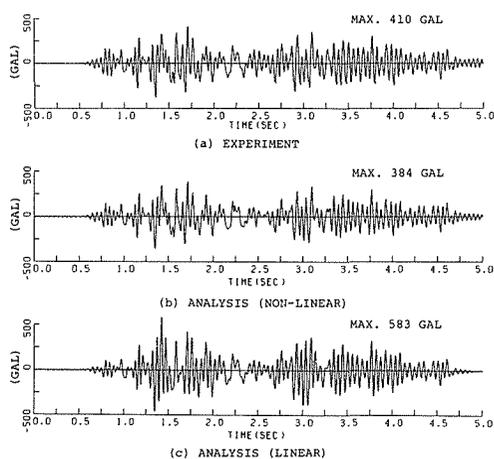


図10 応答加速度の解析および実験結果の比較 (根室半島沖, 229GAL)

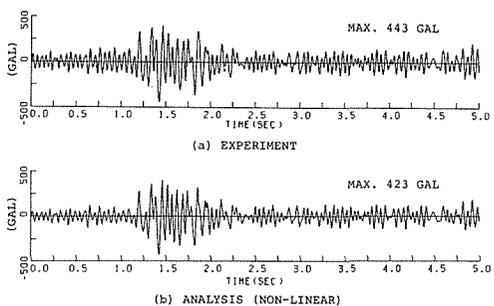


図11 応答加速度の解析および実験結果の比較 (十勝沖, 259GAL)

れており、この壁体構造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。

#### 4. ま と め

水平振動台による縮尺1/6模型振動実験を通じて、コンクリートステイブ・サイロの動的挙動および耐震性の検討を行なった。さらに、小型壁体模型実験および1質点履歴復元力モデルを用いた非線形地震応答解析から、その不連続壁体構造の復元力特性について検討を加えた。得られた主な結果を要約すると次のようになる。

- (1) ステイブ・サイロ模型の振動特性の内容物の有無で極端に変化する。一般的に、内容物を詰込むと正弦波応答倍率は減少し、共振振動数も低下する。しかし、内容物の種類によっても振動特性に対する内容物の影響は著しく異なる。
- (2) 内容物の種類によって、地震波加振時に壁体と内容物が類似した応答特性を示す場合と、両者が全く異なった挙動を示す場合がある。また、内容物を詰込むことで壁体の応答加速度が増大する実験結果も得られた。
- (3) この不連続な壁体構造のステイブ継目の挙動は、模型状態によらず壁体の加速度と非常に類似した応答特性を示し、両者の強い関連性を表わしている。
- (4) 地震波加振振幅の増加に伴って、玄米詰込み状態での壁体上部の加速度応答倍率は、3.0倍から2.0倍まで漸次低下する非線形応答特性を示す。ステイブ継目や内容物の挙動も同様な傾向を持つ。しかし、壁体下部のロッドの動ひずみは逆に増加傾向を見せる。
- (5) 地震波による破壊実験の結果、壁体に微小なひびわれが生じたものの、外壁を締付けているロッドの破断、壁体の崩壊という致命的な現象は起こらず、ステイブ・サイロ壁体構造は十分な耐震性を持つことが明らかになった。
- (6) ステイブ・サイロ壁体構造は壁体材料の降伏以前の段階から、骨格曲線が軟化バネ型である顕著な履歴復元力特性を示す。
- (7) 地震波応答時においてもこの壁体構造は、応答振幅の増加に伴って履歴ループの面積が増加し、剛性勾配が低下する傾向の履歴復元力特性を持つ。また、この特性に起因して、入力加速度の増加に伴って著しく応答倍率が低下する非線形応答特性を示す。
- (8) 解析モデルの動的復元力特性に実験で得られた静的復元力特性が適用でき、この壁体構造の履歴復元力特性は履歴を描く速度に殆ど依存しないと考えられる。また、その動的応答は履歴復元力だけで十分に表現できる。

#### 参 考 文 献

- 1) DeMuth Steel Products Company: Tower Silos for Agriculture and Industry, (1971), p. 5.
- 2) 土木学会鋼構造進歩調査小委員会: 鋼製サイロに関する調査研究報告書, (昭和52, 53).
- 3) ACI Committee 313: ACI Manual of Concrete Practice, Part 4, (1980), p. 1-38.
- 4) National Silo Association: Design Standards for Concrete Stave Silos, (1974).
- 5) 江守一郎, D.J. シューリング: 模型実験の理論と応用, (1973), 技報堂.
- 6) 芳村仁, 佐々木康彦: 第16回地震工学研究発表会講演概要, (1981), p. 265-268.
- 7) Jennings, P.C.: Proc. of ASCE, Vol. 91, No. EM4, (1965), p. 41-68
- 8) 後藤尚男, 家村浩和: 土木学会論文報告集, 第184号, (1970), p. 57-67.