

I-30 不連続壁体構造を有するステイブ・サイロの地震時動ひずみ・動壁圧の応答特性

北海道大学工学部 正会員 佐々木 康 彦
北海道大学工学部 正会員 芳 村 仁

1. まえがき

酪農飼料や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製サイロが数多く利用されている。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 silo)”が、工業用及び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、経済的で施工性に優れたサイロである。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する十分な検討が必要である。

著者等は現在までに、水平振動台によるステイブ・サイロ模型実験及び一体式壁体模型実験を実施し、特に壁体構造の“応答加速度”に注目して、ステイブ・サイロの振動特性・地震時挙動と不連続性や内容物の影響に関する検討を進めてきた¹⁾。本報告は、このような不連続な壁体構造において重要な構成要素であるフープの動ひずみ及び内容物による動壁圧など、壁体の応答加速度以外の地震時応答特性について述べたものである。

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、外壁を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及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/cm³)」を使用し、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と内容物の影響を把握するため、模型内部が空の状態及び内容物を80%詰込んだ状態で、それぞれ正弦波加振実験及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。なお、地震波加速度増大実験の概要については後述する。

計測は壁体外壁及び内容物表面・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測定位置も示してある。

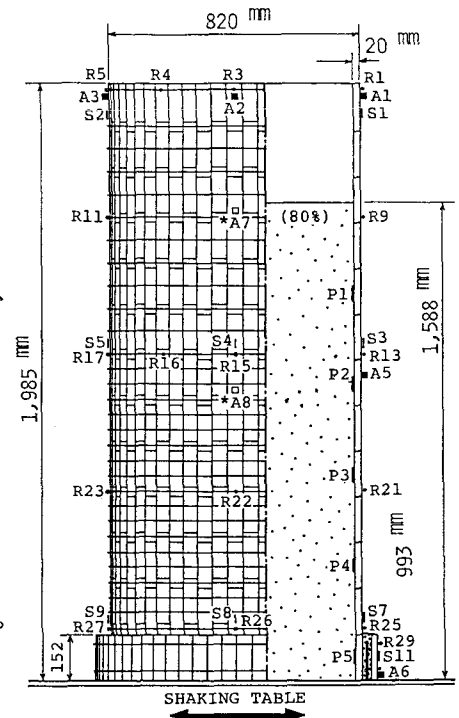


図1 縮尺1/8ステイブ・サイロ模型と変換器の配置状況

3. 正弦波加振実験結果及び考察

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、内容物による壁圧や地震力に抵抗出来る壁体構造となる。したがって、ステイブ・サイロの壁体構造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、正弦波加振実験から得られた特徴的な結果を以下に述べる。

3.1 フープの動ひずみと円周方向振動モード

正弦波定常加振（振幅20gal）による、模型上部での加速度(A1)及びほぼ同一位置でのフープ動ひずみ(R1)の共振曲線を図2に比較して示す。これは模型内部が空の状態：[Empty]での結果である。壁体の応答加速度の共振曲線は31Hzで最大となり、23Hzにも小さなピークが見られる。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、31Hzで「円形モード」、23Hzでは「楕円形モード」であった¹⁾。

これに比べて、フープ動ひずみの共振曲線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、リング状である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何らかの関連性を持つことがわかる。

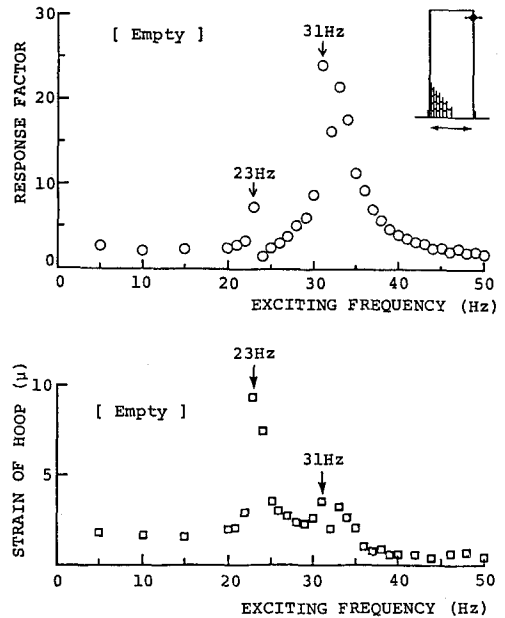


図2 加速度(A1)およびフープ動ひずみ(R1)の共振曲線 [模型内部が空の状態]

4. 地震波加速度増大実験結果及び考察

入力加速度レベルの増大に伴う地震波応答性状の推移を把握するために、次のような“地震波加速度増大実験”を行なった。この実験では三種類の地震波を順次用いて、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及び内容物80%詰込み状態のステイブ・サイロ模型を加振した。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成分及び根室半島沖地震（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。これら三種類の入力地震波の時刻歴波形を図3に示す。但し、模型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。以下では、「根室半島沖地震波」に対する実験結果を述べる。

4.1 入力加速度レベルの増大に伴う地震波最大応答値

壁体外壁と内容物表面・内部の加速度及び壁体(ステイブ)とフープの動ひずみに関する地震波最大応答値を表1に示す。これは約250gal、約650gal及び約1,000galという三段階の入力加速度レベルにおける、内容物80%詰込み状態：[Full(80%)] 及び模型内部が空の状態：[Empty] の結果である。

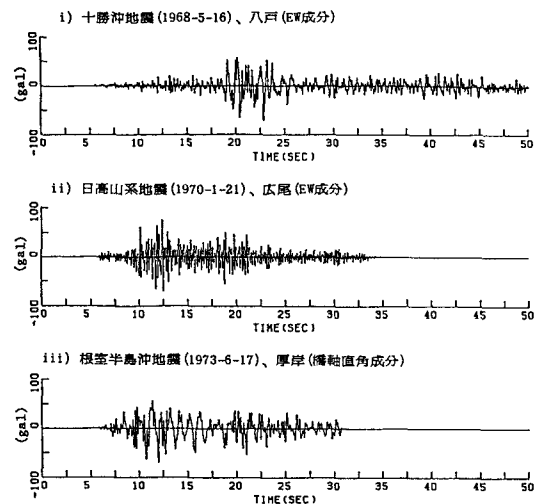


図3 入力地震波の時刻歴波形 [実時間]

内容物表面の加速度(*A7)の最大入力加速度に対する応答倍率は、入力加速度レベルの増大に伴って、2.6から1.0まで順次低下するが、内容物表面の加速度(*A8)の応答倍率はほぼ一定であることがわかる。また、模型内部が空の状態では入力加速度レベルが増大しても、壁体(スティブ)の動ひずみが殆ど生じないことが特徴的である。フープ動ひずみの高さ方向分布性状に関する2つの模型状態での比較などは次節で検討する。

4.2 外壁を締付けるフープ

の動ひずみ応答性状

スティブ・サイロ模型の最上部に位置するフープ動ひずみの最大応答値の円周方向分布性状を図4に示す。この図は入力加速度約1,000galレベルでの2つの模型状態による比較である。同図から、加振軸及び加振直角軸上に位置するフープ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動ひずみ(R1)及び加振方向、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5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、スティブ・サイロ模型において模型内部が空の状態では、スティ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、フープにより大きなひずみが生じたと解釈される。

表1におけるフープ動ひずみの地震波最大応答値をプロットしたものが図6である。入力加速度レベルの増大に伴うフープ動ひずみの高さ方向分布性状に関して、模型内部が空の状態と内容物詰込み状態との比較を表わす。同図から、2つの模型状態では高さ方向分布性状及び

表1 入力加速度レベルの増大に伴う地震波最大応答値
[根室半島沖地震波(厚岸)]

MEASURED POINTS	[Full(80%)]			[Empty]		
	TABLE ACCELERATIONS (gal)					
	228	690	951	258	652	1034
ACCELERATION (gal)						
A1: Top($\theta=0^\circ$)	606	1759	2010	1058	1743	2256
A2: Top($\theta=90^\circ$)	134	1011	785	363	617	914
A5: Mid. ($\theta=0^\circ$)	267	704	831	488	889	1151
*A7: Surface(center)	598	937	995			
*A8: Mid. (center)	277	758	937			
STRAIN OF STAVES (μ)						
S1: Top ($\theta=0^\circ$)	0.5	1.6	2.8	1.5	3.2	7.2
S3: Mid. ($\theta=0^\circ$)	6.2	20.5	26.7	2.3	5.3	11.0
S7: Bot. ($\theta=0^\circ$)	38.6	95.4	*over 200 μ	12.4	8.7	10.5
STRAIN OF HOOPS (μ)						
R1 : Top ($\theta=0^\circ$)	3.6	42.4	50.2	20.5	93.7	198.
R9 : 3/4 ($\theta=0^\circ$)	6.2	36.1	48.5	13.7	60.6	170.
R13: Mid. ($\theta=0^\circ$)	—	21.3	37.1	6.8	8.6	35.3
R21: 1/4 ($\theta=0^\circ$)	6.9	126.	153.	8.0	20.0	72.6
R25: Bot. ($\theta=0^\circ$)	3.4	10.8	11.6	2.3	3.4	7.8

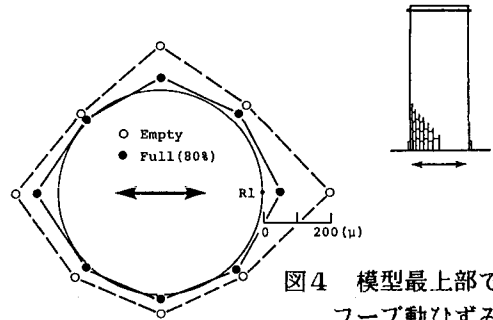


図4 模型最上部でのフープ動ひずみの最大応答値分布の比較

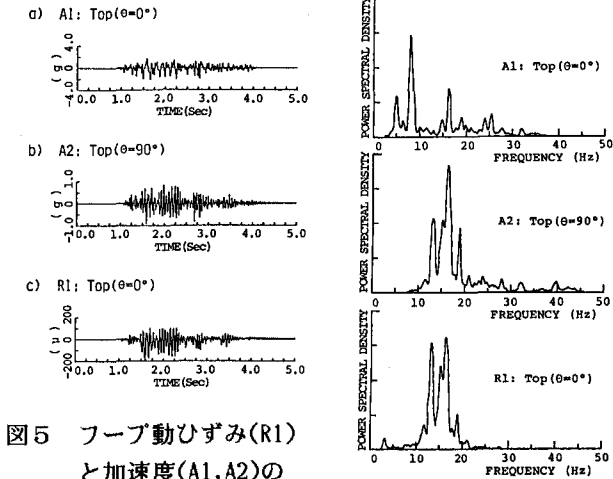


図5 フープ動ひずみ(R1)と加速度(A1,A2)の応答波形・パワースペクトル [模型内部が空の状態]

最大値の発生位置が著しく異なることが明らかである。模型内部が空の状態では、壁体上部に位置するフープ動ひずみが急激に増大している。これは前述したように、断面変形を伴う振動が励起される場合、壁体上部の方が変形しやすいことによると思われる。また、内容物詰込み状態では下端から壁体高の約1/4に位置するフープ動ひずみが増大する。この結果については内容物による動壁圧との関連性が考えられる。

4.3 内容物による動壁圧の最大応答値分布

地震波加速度増大実験から、内容物による動壁圧の最大応答値分布が図7のように得られた。この図は入力加速度レベルの増大に伴う、動壁圧の高さ方向分布性状の推移を表わす。なお、動壁圧の各計測点P1～P5の位置は内容物表面からの距離（深さ）で、それぞれ28cm, 59cm, 90cm, 120cm, 151cmである。同図から、入力加速度レベルの増大に伴って、動壁圧は複雑な分布性状に移行していくことがわかる。壁体下部P4での最大応答値が急激に増大するとともに、内容物表面に最も近いP1での最大応答値も増加傾向を示す。また、壁体最下部P5で必ずしも最大値を示していないこともわかる。この点に関して、模型下端は模型用スチーブで二重に構成されているため壁体部分よりも剛性が高く、計測点P5の最大応答値にはその影響が含まれていると考える。なお、動壁圧の最大応答値が増大する計測点P4は、前節で述べた内容物詰込み状態においてフープ動ひずみが著しく増大した計測点に最も近い位置であり、両者の関連性が示唆される。

5. まとめ

縮尺1/8スチーブ・サイロ模型及び内容物は米を用いた正弦波加振実験・地震波加速度増大実験を行ない、スチーブ・サイロ壁体構造における重要な構成要素であるフープの動ひずみ及び内容物による動壁圧など、壁体の応答加速度以外の地震時応答特性について検討を加えた。

《 参考文献 》

- 1) 芳村 仁、佐々木康彦、山本広祐：プレキャストコンクリートスチーブ・サイロの地震時挙動－壁体構造の不連続性の影響－、土木学会北海道支部論文報告集、第44号、pp.163-166、1988.2

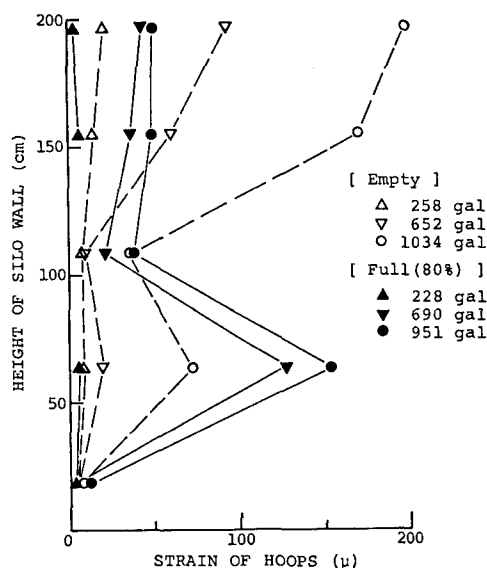


図6 フープ動ひずみの最大応答値の高さ方向分布性状の比較

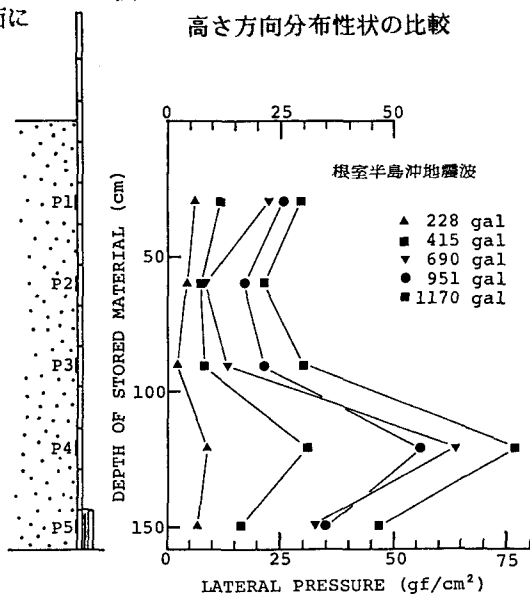


図7 入力加速度レベルの増大に伴う動壁圧の最大応答値分布の推移