

I-14 貯蔵用ステープ・サイロの振動特性について

北海道大学工学部 正員 芳村 仁
北海道大学工学部 正員 佐々木 康彦

1. まえがき

近年、コンクリート・パネル(ステープ)を積み上げ外壁を鉄筋(ロッド)で締付けた大型円筒構造物が、穀物や飼料貯蔵用サイロとして供用されてきている。このステープ・サイロは、他種のサイロに比べ経済的であるため、50年来アメリカ・カナダで使用されているが、地震時における挙動については殆んど不明であるといっている。地震多発地帯である我国にこの種のサイロを建設する場合、その動静挙動を解明し耐震安全性に関する検討が必要であると思われる。本研究は、その第1歩として、ステープ・サイロ模型による振動実験を行ない、基本的振動特性に対するロッドの締付け具合・内容物の有無による影響を検討するとともに、力学モデルの妥当性を検証するための実験データ集積を目的とした。また、従来鋼製サイロ等に使用されている円筒要素モデルをこのステープ・サイロに適用し、実験結果との比較により、円筒要素モデルの適用限界を明らかにした。

2. 振動実験概要

2.1 コンクリートステープ・サイロ模型 実物のステープ・サイロの大きさは種々あるが、ここでは直径6m 高さ12m位を想定する。基本的な振動機構を模型で再現し、視覚的にも振動状態を観察できるように、直径1m、高さ2m程度の模型を設計した。幾何学的縮尺は約1/6である。大型水平振動台上に、円周方向40個、高さ方向8段のステープを組積みし、外壁をロッドでフープシンプした。組立後の模型の寸法および内容物の充填高さを図1に示す。模型および内容物の重量は、それぞれ約570kg、約400kgである。この種の構造物の振動機構にはステープ間の摩擦が重要な要因であるため、模型用ステープは実物と同じコンクリート製とした。長さ26.5cm、幅8.0cm、厚さ3.5cmであり、上下・両側面に接合のための凹凸が付いている。内容物はオガクズを用いた。その単位重量は約0.35gr/cm³であり、実際の飼料とほぼ等しい。

2.2 振動実験手続 本実験では主に正弦波応答実験を行なった。すなわち、加振力として水平振動台に一定振幅の正弦波加振を与え、サイロ模型壁面に設置した加振計により応答加振を測定した。

測定項目は次の通りである。

- i) 加振振幅数へ加振応答値
- ii) 振動モード〔円周方向(Top, Mid), 高さ方向($\theta=0^\circ$)〕
- iii) 加振振幅へ加振応答値

ここで、応答加振の測定方向は、すべて半径方向(壁厚方向)である。

i), iii)の実験時の加振計設置位置は図1に示す。ii)の振動モードについては、円周方向8点(45°毎)、高さ方向は7点で測定した。なお、変位振動モードは、振動台の振幅・位相差および測定点と加振方向との角度を考慮して相対加振度を求め、さらに調和振動における加振変位・変位相との振幅・位相の関係より得た。

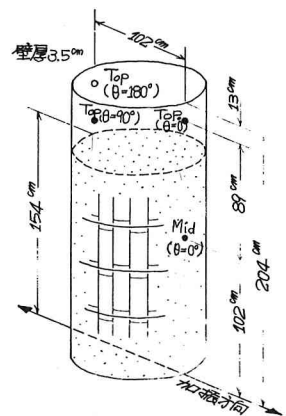
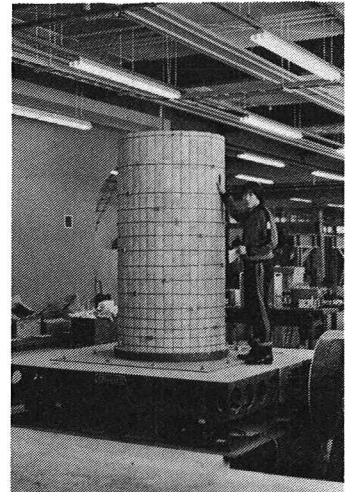


図1 サイロ模型と測定位置

3. 実験結果および考察

本実験では、同一の模型を次の3つの状態にし、おのおのの状態ご前記の各実験を行なった。

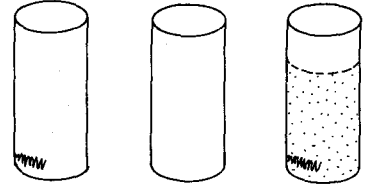
(a) Empty・Tight: 模型の中は空で、ロッドは通常の締付け状態。

(b) Empty・Loose: 模型の中は空で、ロッドは緩く締付けられた状態。

(c) Full・Tight: 模型の中にオガクズを充填した状態。ロッドの締付け具合は(a)と同じ。

したがって、(a) Empty・Tight の状態を基準とし、(a)と(b)、(a)と(c)の実験結果を比較することにより、ロッドの締付け具合・内容物の有無による振動特性への影響の検討が可能である。

以下に、実験結果を示す。



(a) Empty・Tight (b) Empty・Loose (c) Full・Tight

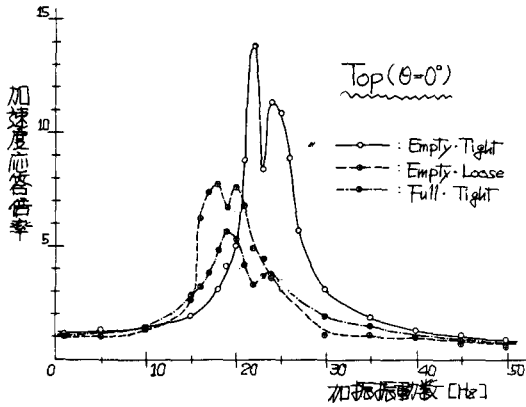


図2 加速度応答共振曲線 (50 gal)

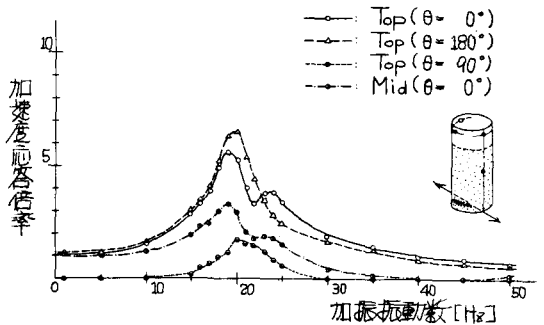


図3 加速度応答共振曲線 (Full・Tight, 50 gal)

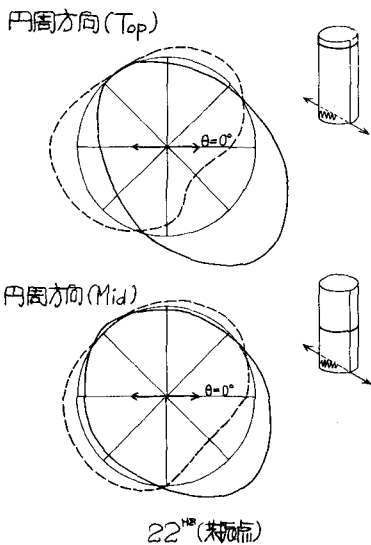


図4 正変位振モード (E・T, 50 gal)

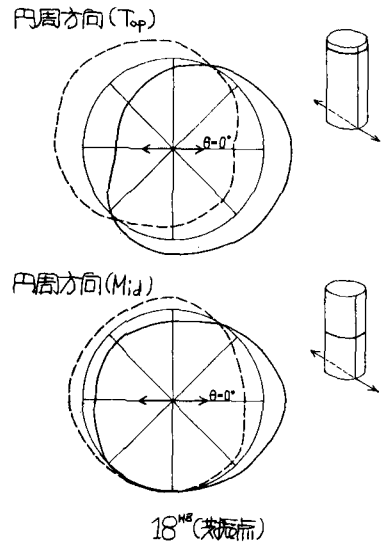


図5 正変位振モード (E・L, 50 gal)

図2は、加振振幅 50 gal の場合の測定点 Top ($\theta=0^\circ$) における加速共振曲線を、3つの模型状態間で比較したものである。内容物の充填による固有振動数の低下・応答倍率の減少は経験的にも推定できるが、この実験で定量的に裏付けられた。また、ロッドの締付けが緩い場合も同様の傾向を示している。これはステーブ間の摩擦がより大きく減衰効果として働いたためと思われる。

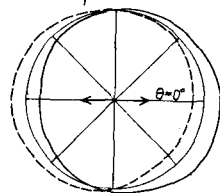
図3は、(C) F・T の場合の各測定点での共振曲線を示す。構造上対称な位置にある Top ($\theta=0^\circ$) と Top ($\theta=180^\circ$) で共振点の位置および応答倍率が異なっている点が、この構造の特殊性をあらわしている。(a) E・T、(b) E・L の場合も同様であり、特に (b) E・L の場合、その相違が大きかった。

図4、5、6は、各模型状態の第1次固有振動数に対応する円周方向 (Top, Mid) の変位振動モードである。応答加速変形もほぼ正弦波形であったことから、前述のように相対加速度より求めたものである。各測定点間に位相差があり、図には加振軸上 $\theta=0^\circ$ の測定点の正負ピーク時にあつた振動モードを示してある。図4、5からわかるように、中が空の場合、正負ピーク時の振動モードが異なっている。また、(a) E・T の場合、加振方向に變形量が最大となっていない。これらのことは、あくまでもひとつの模型実験結果であるが、ステーブ寸法のはらつき・ロッドの締付け方によるステーブ側面での摩擦の不均一さ等により、実際のステーブ・サイロでもこの様な連続体の場合と異なる挙動を示すことが推測される。中が空の場合に比べ、内容物が充填された場合、変位振動モードは円形に近くなり、変形量も小さくなることからわかる。また、全体を通してみると、Top と Mid で同じ様なモードで動いている。

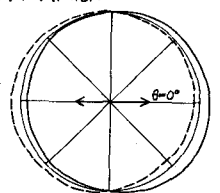
図7は、加振軸上 $\theta=0^\circ$ での高さ方向の変位振動モードである。円周方向の場合に比べ、内容物の充填による影響が小さい。また、ロッドの締付け具合が緩いと、その影響が強く出ることからわかる。

図8は、振動台の加振振動数を各模型状態の共振点で一定とし、加振振幅を 20 ~ 100 gal の範囲で変化させた場合の加速応答倍率を示す。

円周方向 (Top)



円周方向 (Mid)



19 Hz (共振点)

図6 正負変位振動モード (F・T, 50 gal)

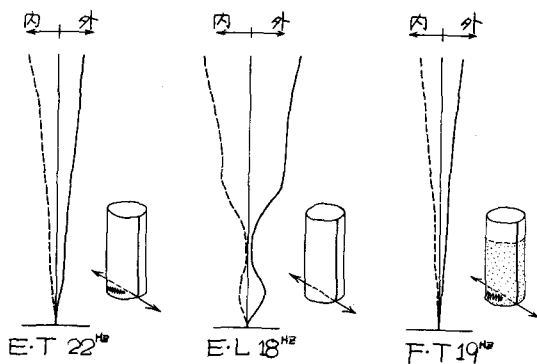


図7 正負変位振動モード (高さ方向 $\theta=0^\circ$, 50 gal)

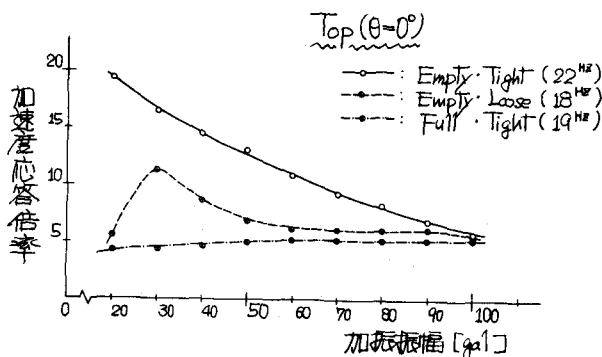


図8 加振振幅～応答倍率 (各共振点)

筒形振動理論によると、応答倍率は共振振幅によらず一定であるが、実験結果は図8の様に非線形性を示している。図8はTop ($\theta=0^\circ$)の場合であるが、測定位置[Top ($\theta=0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$), Mid ($\theta=0^\circ$)]によらず同一の傾向を示した。なお、模型の状態にかかわらず、共振点をはずれた点では応答倍率がほぼ一定であった。このことから、共振点に近づき変形量が大きくなるに従って、ステープ上下面の凹凸・側面摩擦の不均一さの影響が強くなり、非線形性を示すものと思われる。

4. 円筒要素モデルによる計算結果

円筒要素モデルを、本振動実験に用いたサイロ模型に適用し、固有振動解析を行なった。サイロ模型を壁厚一定なるコンクリート円筒構造物と見なして解析した。数値計算に用いた諸量は以下の通りである。高さ204.0cm、半径51.0cm、壁厚3.5cm

弾性係数 $3.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$, ポアソン比 1/6

単位体積重量 $2.33 \times 10^{-3} \text{ kgf/cm}^3$

境界条件は、上端自由・下端固定である。頂部および固定部付近の要素分割を細かくし、また要素分割数による解の収束状況を検討して最終的に16要素不等分割とした。計算結果を表1に示す。

サイロ模型の第1次固有振動数の実験値が20th前後(図2参照)であるのに対し、計算値はその数倍も大きな値となっている。さらには、実験結果から得られた様な、ロッドの締付け具合で固有振動数が変化する点、真円とも楕円とも言えない振動モードである点などは、この円筒要素モデルでは表現できない。実験結果と解析の相違は、ステープ・サイロ模型と円筒要素モデルとの、根本的な振動機構の違いによるものと思われる。以上により、この種のサイロは形状的には円筒構造物であるが、円筒要素モデルでは解析できないことがわかった。

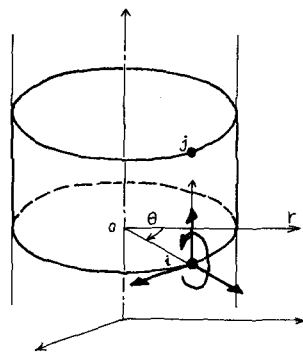
5. あとがき

ステープ・サイロ模型実験により、固有振動数・応答倍率・振動モードなど、その基本的振動特性に円筒物の有無・ロッドの締付け具合が強く関連しているという結果が得られた。また、共振点に近づくにつれて非線形振動になることがわかった。

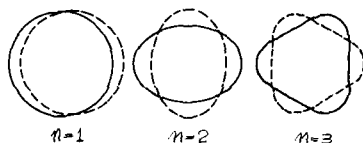
この種のサイロを理論解析するためには、基礎的実験に基づきロッドの締付け具合・ステープ間の側面摩擦など構造の特殊性を考慮した力学モデルを開発する必要があると考える。

参考文献

- 1) ACI Standard Recommended Practice for the Construction of Concrete Farm Silos (ACI 714-46), Journal of the ACI, Vol. 18, No.2, October 1946
- 2) 高橋圭二: サイロの材料と強度—コンクリートステープ・サイロ構造物の予備実験, 北海道大学工学部農業工学科卒業論文, 1977
- 3) 江守一郎, D.J. シューリング: 模型実験の理論と応用, 花報堂, 1973



円筒要素モデル



円周方向フル波節数展開(展開次数n)

高さ方向	円周方向展開次数 n		
	1	2	3
1次	120 ^{Hz}	77 ^{Hz}	176 ^{Hz}
2次	397 ^{Hz}	233 ^{Hz}	236 ^{Hz}

表1 固有振動数(計算値)