

(25) 群サイロの静的及び動的挙動に関する解析的研究

フジタ工業(株)技術研究所 ○ 鈴木 俊男
 東京大学 生産技術研究所 羊谷 裕彦

§1 はじめに

本報告は、群サイロ (SILO GROUP) の様な塔状型薄肉円筒シェルを多数組合わせた複合シェル構造物の地震時における静的応力性状と振動性状を解析的に検討したものである。

サイロに関する既往の研究は、粉体圧の研究が主であり、他に地震時における粉体の有効質量の研究²⁾、鋼サイロの座屈の研究等^{3), 4)}が行なわれているが、それらはすべて単体サイロに関する研究である。

群サイロとは、図1に示すように、多数の単体サイロ同志を、軸方向に接触あるいは壁を介して結合された構造物であり、その力学的特徴は、単体サイロに対して剛性が高い剪断変形卓越型の構造物であること、並びに平面形状が円形リングの集合体であるため応力性状が複雑なることである。

著者等は、既に水平力を受ける群サイロを解析するために、比較的簡単に計算できる群梁モデルと称する解析モデルを提案することにより、静的弾性状態における変位と応力に及ぼすビン数並びに接合壁の効果について考察した⁵⁾。また文献⁶⁾では動的挙動としてビン数の違いによる固有モードの変化及び内容物が偏在した場合の地震時応答性状について調べた。本報告では、引き続き静的荷重下における変位と応力に及ぼすサイロの高さの影響と、固有モードに対する接合壁の効果及びサイロ支持部(スカート部)の剛性の効果について検討した。

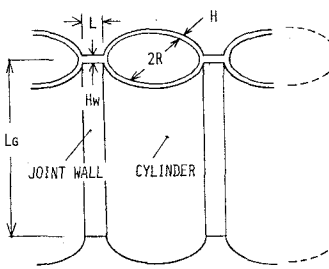


図2 記号の説明

更に、地震応答計算では、応答量に對するビン数並びに支持剛性の影響について考察した。

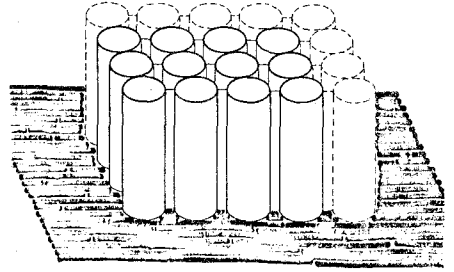


図1 群サイロ構造

§2 解析モデル

本報告で取扱うサイロは、近年多用されているRC製サイロの標準的なサイロを想定して、構造体の寸法を、下記の諸数値とした。(図2) 円筒壁の高さ $L = 30 \text{ m}$ 、半径 $R = 3.75$ 、壁厚 $H = 0.2 \text{ m}$ 、接合壁の長さ $L = 2.75 \text{ m}$ 、壁厚 $H_w = 0.4 \text{ m}$ 、ヤング係数 $210 \times 10^6 \text{ t/m}^2$ 、ポアソン比 0.17 、比重 2.4 t/m^3 、内容物の比重は主副ビン共に 0.8 t/m^3 (内容物の全体重量は躯体比率で4倍)、並進質量、回転質量共に、内容物の全質量を躯体質量に加算して求めた。但し固有値計算で扱う質量は分布質量ではなく集中質量として扱った。

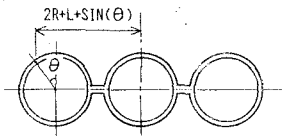


図3 BEAM モデル

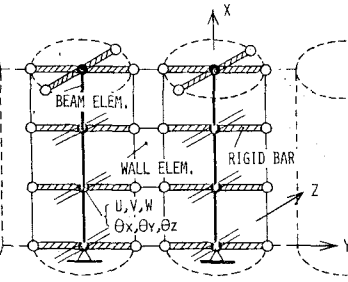


図4 BEAM GROUP モデル

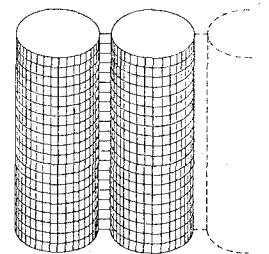


図5 SHELL モデル

群サイロに対する解析モデルとしては、次の3種類が考えられる。一つは、図3に示すように群サイロ全体が一断面をもつ梁として考える梁モデル、二つ目は、着春等が提案した群梁モデルと称するもので、個々のサイロを個別の梁に置換するモデル(図4)

表1 解析モデルの特徴

	全体変形量	せん断力分布	接合壁の剛性	局部応力
BEAM モデル	○	○	×	×
BEAM GROUP モデル	○	○	○	×
SHELL モデル	○	○	○	○

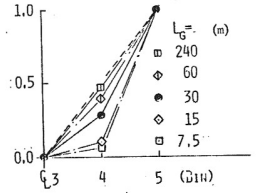


図10.1 各ビン腰部の軸力分布(5ビン)

オは、群サイロの内筒壁をシェル構造体として取り扱うシェルモデル(図5)である。表1に、以上述べた3種類の解析モデルの特徴を示したが、群梁モデルは、内筒壁脚部の曲げモーメントや円筒壁と接合壁における面外せん断力等の局部応力に対しては求まらないが、群サイロの重要な構成要素である接合壁の効果については考慮することができる長所をもつモデルといえる。

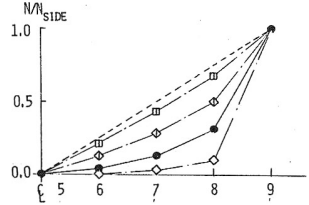


図10.2 各ビン腰部の軸力分布(9ビン)

群梁モデルとは、単体サイロを梁要素、接合壁を面内及び面外剛

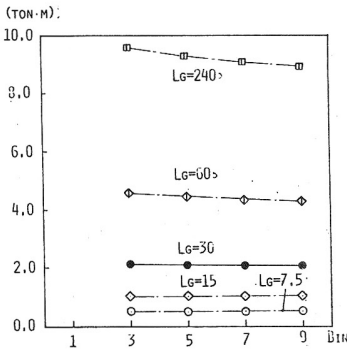


図9 BIN数による固定部曲げモーメントの変化(中央サイロ)

図6. サイロの高さとBIN数の違いによる頂部水平変位の変化

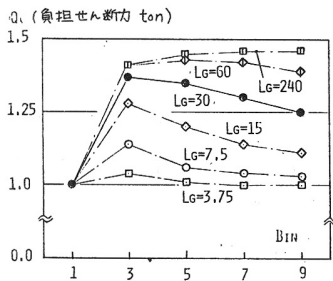


図7. サイロの高さとBIN数による負担せん断力の変化(中央サイロ)

6 (1ビンの変位に対する比率)

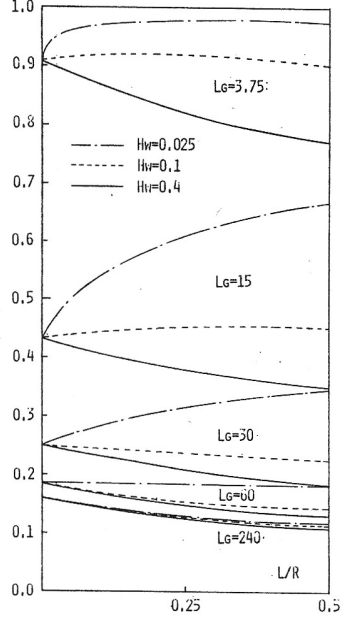


図11. サイロの高さ、及び接合壁の長さ及び厚さの違いによる変形(撓み)の変化

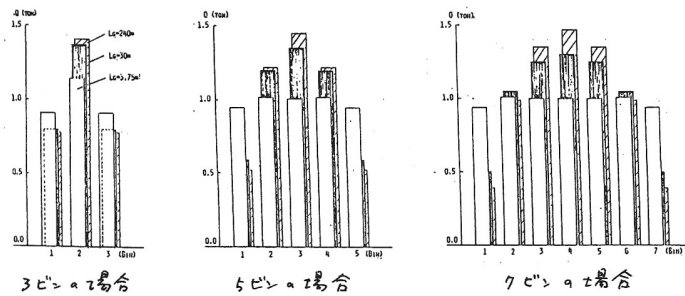
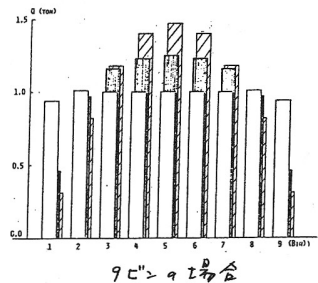


図8. 各ビンに対する負担せん断力



9ビンの場合

性をもつ板要素で置換し、梁の中心軸からYZ各方向に剛棒を出すことにより、円筒側面で板要素と結合させるモデルである。板要素との接合点における変位の自由度は、板要素のもつ自由度と全く同じであり、剛棒と板要素は面外の回転自由度だけは拘束されていない剛接合となっている。

5.3 静的解析

文献5)では、サイロの高さ(LG)を300mに固定してビン数と接合壁の効果を調べたが、本報告では、高さを変化させて応力や変形を調べることにし、群サイロの剪断変形と曲げ変形の支配範囲をより明確化した。

図6に、高さを変化させた時の頂部水平変位のビン数に関する遷移を、各高さに対する1ビンの変位を基準にして示したものである。高さが半径と同程度(LG=275)になると、ビン数による変位の変化はほとんどなく、完全にせん断変形卓越型であるが、LG=30程度では、LG=240の値に近づいており、その限りでは曲げ変形卓越型にも見える。しかし、図7の中央サイロの負担せん断力をみると、高さが低い場合には、一様に負担せん断力が3ビンをピークに減小していることがわかる。また、図8には3ビンから9ビンまでの個々のビンの負担せん断力をグラフ化したものを示しているが、LG=30mは3ビン、5ビン程度では曲げ変形時の負担割合に近いが、それ以上のビンになると、曲げ変形時とせん断変形時の中間値をとることがわかる。図9に、サイロ脚部の曲げモーメントの大きさを示したが、ビン数の影響はほとんど受けないこと並びに、高さが低い時には、その大きさは高さ按比例して増すが、LG=60m以降からはその増加率は減少することがわかる。

図10に、5ビンと9ビンの場合について、各ビンの軸力の分布を、最外端のサイロの軸力を基にして表わした。LG=15m以下では、軸力は最外端

のビンだけが負担していること、軸力分布が曲げ変形時の線形分布になるのは5ビンの時はLG=60以上、9ビンの時はLG=240m以上高さが必要となることがわかる。図11は、接合壁の剛性の効果を高さをパラメーターにして検討したものである。高さが15m以下で、壁厚が0.1m以下のときには壁の長さを増してサイロ全断面に関する断面2次モーメントを大きくしても変形は小さくならない。逆に、壁厚を0.25mにすれば、壁の長さを増せば、変形も

増すことがわかるが、その増加はある値に漸近している。LG=60m以上では、壁厚を非常に小さくしても、曲げ変形が支配的でビン同士の相互作用があまりないために

壁の長さを増せば、変形は徐々に減少する。LG=240mになると、その傾向は更に誇張されて壁厚の影響は壁長の影響と比較してほとんどないに等しいことがわかる。

表2 固有周期(正方形プラン)

	NO. MODE	BINS		
		1x1	3x3	5x5
FLEX. DEF. + SHEAR. DEF.	1st	0.542 Y1	0.286 Y1	0.249 Y1
	2nd	0.542 Z1	0.286 Z1	0.249 Z1
	3rd	0.145 L1	0.200 G1	0.214 G1
	4th	0.133 Y2	0.118 L1	0.115 L1
	5th	0.133 Z2	0.106 Y2	0.100 Y2
	6th	0.095 X1	0.106 Z2	0.100 Z2
	7th	0.070 L2	0.091 X1	0.090 X1
	8th	0.070 Y3	0.073 G2	0.079 G2
	9th	0.053 Z3	0.064 -	0.076 -
	10th	0.039 L3	0.064 -	0.070 -
ONLY FLEX. DEF.	1st	0.507 Y1	0.220 Y1	0.166 Y1
	2nd	0.507 Z1	0.220 Z1	0.166 Z1
	3rd	0.145 L1	0.120 G1	0.116 G1
	4th	0.097 Y2	0.118 L1	0.115 L1
	5th	0.097 Z2	0.091 X1	0.090 X1
	6th	0.095 X1	0.069 Y2	0.071 Y2
	7th	0.053 L2	0.069 Z2	0.071 Z2
	8th	0.039 Y3	0.052 -	0.065 -
	9th	0.039 Z3	0.044 -	0.053 -
	10th	0.039 L3	0.044 -	0.053 -

固有周期(秒)

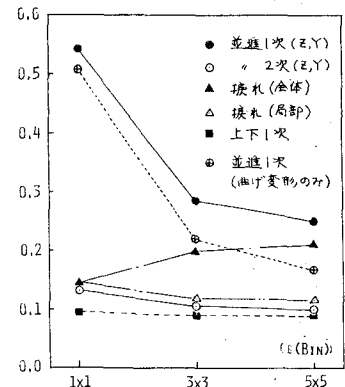


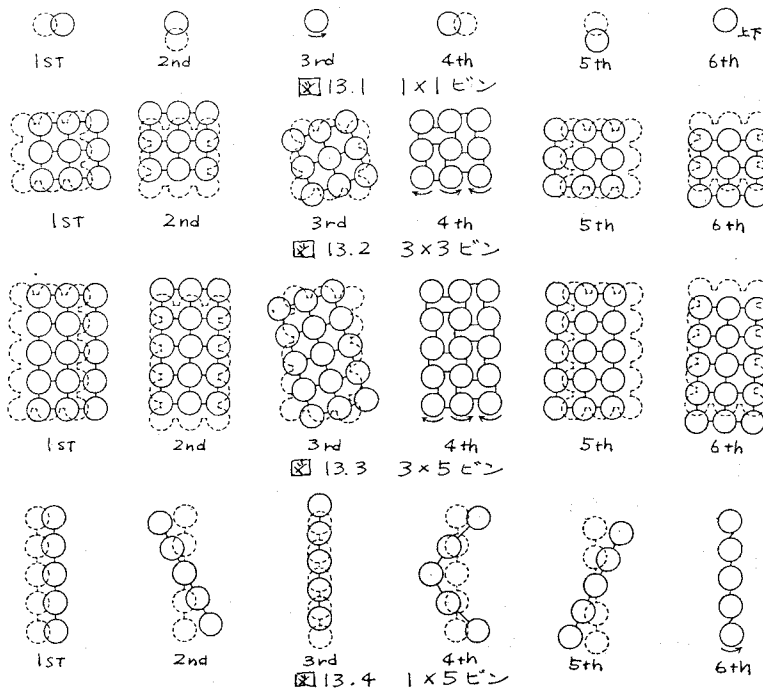
図12 ビン数による固有周期の変化(正方形プランの場合)

§ 4 動的解析

4.1 固有モード解析

解析対象としたサイロは静的解析と同一のモデルを用いた。高さ方向の要素分割数は3分割とした。解析に用いた質量は集中質量であるが、分布質量との比較の結果、3分割の場合には、2次モードにおける固有周期の誤差は、数%程度であったので、今回の解析で各モードで2次までは信頼できる値であると思われる。

表3から表7の中、固有周期の数字の横にある英数字は次のモード形を示している。



Yn: Y方向

表3 固有周期(長方形プラン)

NO.MODE	BINS			
	3x1	3x3	3x5	3x7
1st	0.542 Z1	0.286 Y1	0.286 Y1	0.286 Y1
2nd	0.288 Y1	0.286 Z1	0.249 Z1	0.237 Z1
3rd	0.232 G1	0.200 G1	0.218 G1	0.235 G1
4th	0.153 B1	0.118 L1	0.117 L1	0.116 L1
5th	0.133 Z2	0.106 Y2	0.106 Y2	0.106 Y2
6th	0.130 L1	0.106 Z2	0.100 Z2	0.097 Z2
7th	0.107 Y2	0.091 X1	0.090 X1	0.092 G2
8th	0.093 X1	0.073 G2	0.084 G2	0.070 X1
9th	0.086 G2	0.064 Y3	0.070 Y3	0.075 -
10th	0.070 Z3	0.064 Z3	0.064 Z3	0.072 -

表4 固有周期(1列プラン)

NO.MODE	BINS			
	1x1	1x3	1x5	1x7
1st	0.542 Y1	0.542 Y1	0.542 Y1	0.542 Y1
2nd	0.542 Z1	0.288 Z1	0.315 G1	0.376 G1
3rd	0.145 L1	0.232 G1	0.250 Z1	0.253 B1
4th	0.133 Y2	0.153 B1	0.204 B1	0.237 Z1
5th	0.133 Z2	0.138 Y2	0.158 G2	0.194 G2
6th	0.095 X1	0.130 L1	0.137 L1	0.161 B2
7th	0.070 L2	0.107 Z2	0.133 Y2	0.142 G4
8th	0.070 Y3	0.073 X1	0.127 G3	0.133 Y2
9th	0.053 Z3	0.086 B3	0.108 B2	0.131 L1
10th	0.039 L3	0.070 Y3	0.101 B2	0.125 B5

並進n次モード

Zn: Z方向

並進n次モード

Gn: 全体揺れ

n次モード

Ln: 局部揺れ

n次モード

Xn: X方向

上下n次モード

Bn: 弓形

n次モード

YGn: Y方向

並進+揺れ

n次モード

Zn Xn:

Z方向並進+

X方向上下モード

—: 明確な名称がないモード

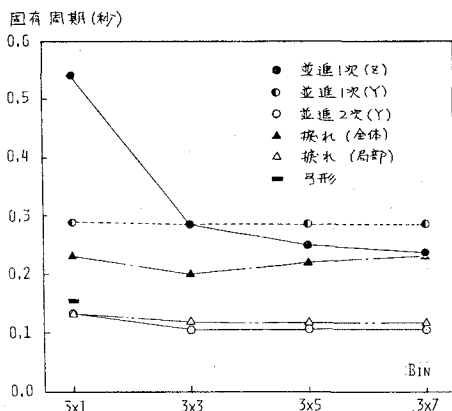


図14 ビン数による固有周期の変化(長方形プランの場合)

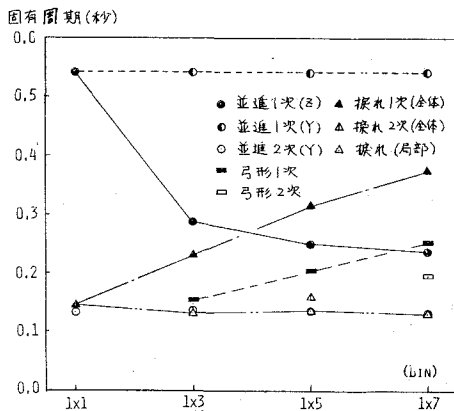


図15 ビン数による固有周期の変化(1列プランの場合)

表2と図12に、正方形プランの場合の固有周期を示した。モード1, 2モードは、固有値は重複となり並進1次モード, 3次が全体振れモードである。次の4次モードで、個々のサイロ自体の局部振れモードが生じている。図13.2のモード図から、このモードは接合壁の剛性には無関係な変形をしているので、確かに存在するものと思われるが、本解析では振り回転質量を躯体質量と同様に円筒壁の壁体中に存在しているものと仮定したので実際よりも、回転質量を過大評価したため生じたと推定される。図12から並進モードは、3x3ビン以降は大きく減少しないことがわかるがこれは静的解析結果と同様に、ビン数が増すことによりせん断変形が卓越したためである。また、振れ周期は、ビン数の影響を大きく受けにくいことがわかる。この現象は、図15の1列プランの振り周期の着しい増加と対比すると興味深い。

表3と図14にY方向3ビンも固定して、Z方向のビン数を変化させた長方形プランの固有周期を示している。表3の3x3, 3x5, 3x7の各モード形を比較すると6次までは、3層共全く同一のモードとなっている。表4と図15に1列プランの場合を示したが、1次2次は並進、3次は振りモードであるが、5ビン以降は、振りと弓形モードの周期がZ方向並進1次周期を上回り、より低次モードになっている。

表5と図16に偏在載荷による固有周期の影響を示した。(3x5ビンの場合) 偏在載荷の場合にはY方向並進と振れモードが連成して生じ、1次と3次モードになっている。

接合壁の長さや厚さの影響については表6と図17に示した。壁の厚さが薄くなる(Lw=0.025)長さが増大(Lw=0.4)することによる断面剛性の

表5 固有周期 (偏在載荷)

NO. MODE	NUMBERS OF BIN LOADED		
	5/5	3/5	1/5
1st	0.286 Y1	0.254 Y4	0.195 Y81
2nd	0.249 Z1	0.205 Z1	0.151 Z1
3rd	0.218 61	0.147 Y62	0.118 Y62
4th	0.117 L1	0.100 62	0.076 Z2X1
5th	0.106 Y2	0.095 Y2	0.076 Y2
6th	0.100 Z2	0.090 Z2X1	0.074 62

固有周期(秒)

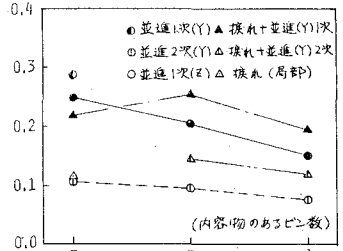


図16. 偏在載荷による固有周期の变化

表7. 固有周期 (弾性支持剛性)

NO. MODE	COLUMN DEPTH (m)		
	0.5	1.0	∞
1st	0.753 Y1	0.349 Y1	0.286 Y1
2nd	0.720 Z1	0.304 Z1	0.249 Z1
3rd	0.504 61	0.260 61	0.218 61
4th	0.226 Y1	0.126 Y2	0.117 L1
5th	0.189 Z2	0.126 62	0.106 Y2
6th	0.143 X1	0.119 Z2	0.100 Z2

固有周期(秒)

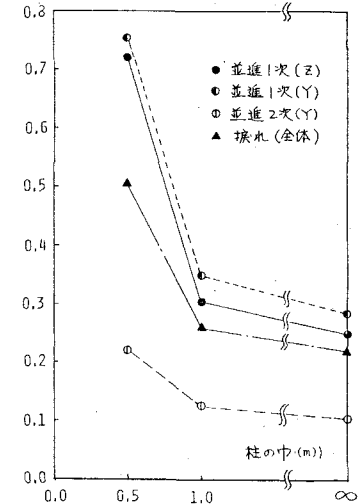


図18. 支持部(スカート部)の柱中による固有周期の变化

表6. 固有周期 (接合壁の長さ・厚さ)

WALL THICK (HW)	NO. MODE	LW/R		
		0.05	0.2	0.5
0.40	1st	0.305 Y1	0.286 Y1	0.259 Y1
	2nd	0.264 Z1	0.249 Z1	0.227 Z1
	3rd	0.227 61	0.218 61	0.207 61
	4th	0.110 Y2	0.117 L1	0.131 L1
	5th	0.104 Z2	0.106 Y2	0.127 Y2
	6th	0.094 X1	0.100 Z2	0.123 Z2
0.025	1st	0.317 Y1	0.339 L1	0.351 L1
	2nd	0.280 Z1	0.332 Y1	0.346 Y1
	3rd	0.263 61	0.311 L2	0.339 L2
	4th	0.199 —	0.302 L3	0.335 L3
	5th	0.188 L1	0.299 L4	0.330 L4
	6th	0.146 61	0.288 L5	0.321 L5

固有周期(秒)

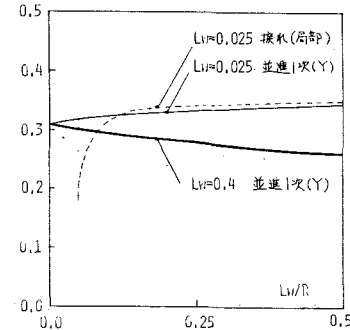


図17. 接合壁の長さや厚さに対する固有周期の变化

効果よりも、壁を介した個々のサイロの結合効果が小さくなるため、長さが大きくなっても変形は減少しない。この現象は多くの静的解析結果とも一致する。

表7と図18にスカート部の剛性が固有周期に与える影響を調べた。(3×5ビン)剛性の変化は柱の中を0.5m, 1.0m (標準) 完全固定の3種類として行なった。1.0mの場合には、固定の場合と多少週期が伸びる程度であるが、柱中を0.5mにすると各方向並進1次は、固定の場合の2.5倍となり、Y方向の固有周期が接近する。これは上部構造の変形よりも支持部における水平移動が大きいためである。また、モード形の順番には、支持部の剛性は影響しないことがわかる。

4.2 地震応答解析

表2に示した正方形プランと表7に示した支持部剛性をもつ群サイロに関して地震応答解析を行なった。地震波

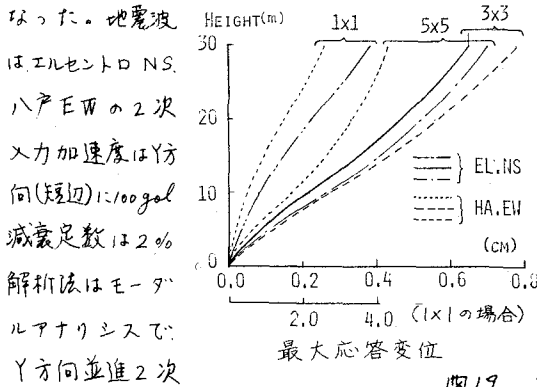


図19. 正方形プランの群サイロの応答結果

モードまで考慮して、応答次数は6次とした。

図19に、正方形プランの場合の応答変位、絶対加速度、せん断力係数を示している。頂部最大応答変位量は、単ビンの時にエルセントロ波で、約 3.5 cm となり、3ビンと5ビンの差は顕著に出なかった。絶対加速度の最大値は 560 gal であり、中央サイロ基部の最大せん断力係数は 0.57 程度であり、共に単ビン、エルセントロで生じた。

図20に、支持部剛性をもつ3×5ビンの応答解析を行なった。最大応答変位量は、柱中0.5mの場合で、支持部変位量 4.0 cm、頂部変位量 6.0 cm、上部構造の相対変位量は 2.0 cm であり、絶対加速度の最大値は柱中1.0mのハル波の時に約 780 gal となり、これは、他に 400 gal 以下である。応答せん断力係数の最大値は、0.78 であり、また、支持剛性の違いによる応答量の傾向は明確でないが、柱中0.5m程度の剛性では、より地震波

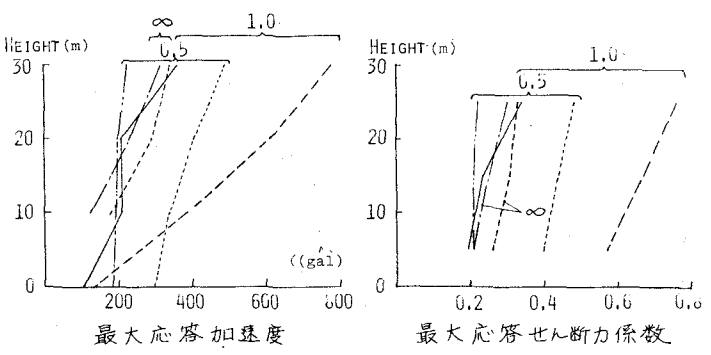
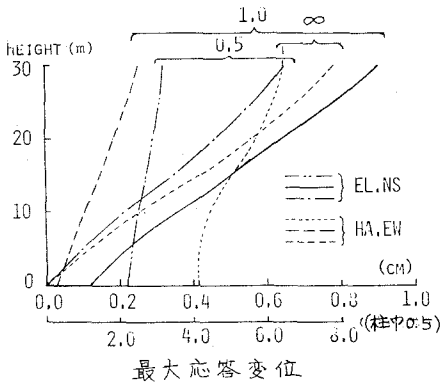
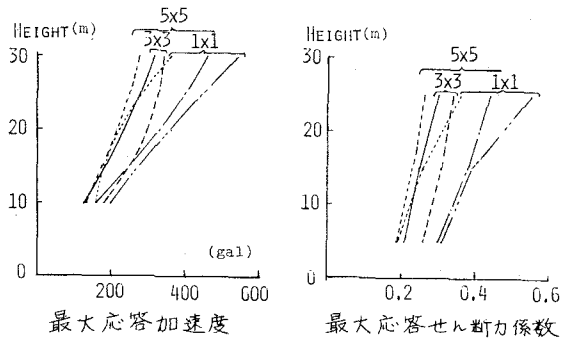


図20. 弾性支持(スカート部剛性考慮)条件下の応答結果

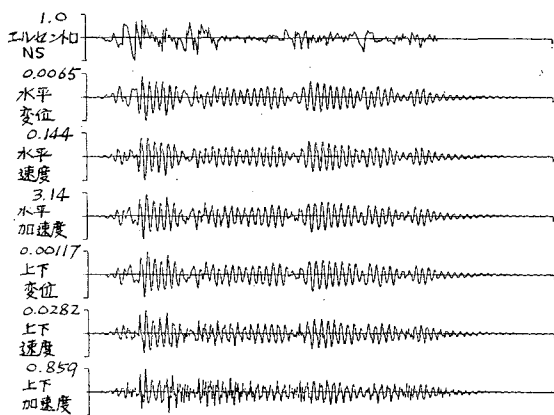


図21 エルセントロ波による応答波形

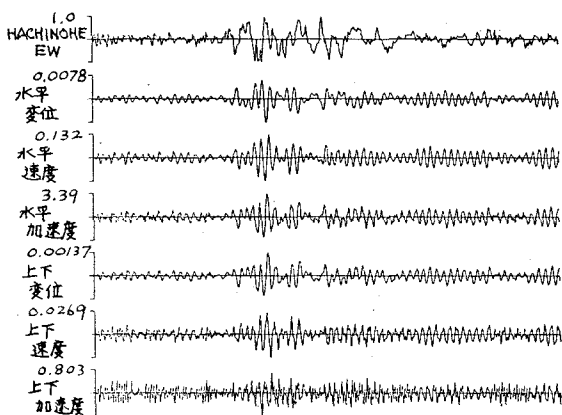


図22 八戸波による応答波形

に共振したものと考えられる。また、応答次数を6次から2次に減らした応答結果は、変位についてはほとんど差はないが、絶対加速度とせん断力係数は10%以上の誤差を生じる場合があった。

図21, 22とは、表3で示した3x5ゼンの長方形プランのエルセントロ波と八戸波の応答波形を示した。はじめの1波は入力地震動を100%に正規化したもの、2番目から4番目までは、中央サイロ頂部に於ける水平方向、また、5番目から7番目までは、中央サイロと入力方向に隣接したサイロの頂部に於ける上下方向の変位、速度、加速度を示している。諸量の最大値を生じる応答時刻は、両波共に、原波の最大加速度を生じる時刻から多少遅延していることがわかる。

§ 7. 結論

円筒型と塔状型に多数組み合わせで構成される群サイロの解析を、群梁モデルという比較的簡単な解析モデルを用いて、静的挙動並びに動的挙動について考察した。静的解析では、サイロの高さをパラメータにして、ビン数や接合壁の効果と調べた。その結果、一般に用いられている高さ30mの群サイロは、変形では曲げ変形卓越型に近い挙動をするが、応力的にはせん断変形卓越型の領域に入ること(図6, 図7)、接合壁の厚さの効果は高くなる程、薄くなること等がわかった。

動的解析では、固有モード解析を行なった結果、並進と全体振りモードに続いて、各サイロの局部的な振りモードが比較的伯次に生じること、接合壁の厚さは非常に薄くなること、長さで大きくし剛性を増しても、変位は小さくなることなどがわかった。以上の結果、群サイロの力学的挙動を概念的に把握する手段として、本報告で提案した群梁モデルがかなり有効であることと確認した。今後は、更に本モデルの妥当性を検証するほか、シロモデル等より精密な解析結果との対比を行なうと共に、本論文で得られた諸結果を実験的に追試する必要があると考える。

《 参考文献 》

- 1) 杉田, 高木 「サイロにおける貯槽形状と粉体圧」 日本建築学会大会 1982, pp 1159
- 2) 柴田, 松村, 門 「鋼製サイロの振動特性に関する研究」 日本建築学会大会 1981, pp 903
- 3) 内山, 山田, 吉田 「橋荷重を受ける円筒殻の座屈に関する研究(予報)」 建.大会号, 1982, pp 1103
- 4) 米田, 後藤, 半谷 「橋荷を受ける塔状型円筒型シロの座屈破壊(予報)」 建.大会号 1981, pp 1177
- 5) 鈴木, 半谷 「水平力を受ける群サイロの解析的研究」 日本建築学会大会理研集 1982, pp 1135
- 6) 鈴木, 半谷 「円筒型群サイロの振動特性」 第32回応用力学連合会, 1982, pp 1135

STATIC AND DYNAMIC BEHAVIOURS OF SILO GROUP
UNDER EARTHQUAKE LOADINGS

By Toshio SUZUKI* and Yasuhiko HANGAI**

The reinforced concrete silo group subjected to earthquake loadings is analyzed both statically and dynamically. The structure referred as silo group in this paper is that of collectivity of some cantilevered cylindrical shells jointed together either directly or with connection walls. Recently, a lot of researches on the mechanical behaviours of silos has been treated analytically and experimentally. In these investigations, the discussion is, however, mainly focused on the evaluation of mechanical characteristics of the isolated silo, and evaluation of internal pressures and that of the equivalent mass of stored materials or the buckling analysis under horizontal loads are carried out. In this paper, as compared with these researches, the interaction effects between each structure are taken into account. The treatment like this enables us to research the mechanical behaviour as the structure group, not as an isolated one.

If we use ordinary numerical methods as Finite Element Method or Finite Difference Method, the computational time or costs amount to so large and moreover, qualitative considerations seem difficult because of many degrees of freedom. In this paper, a simple mechanical model so called 'Beam Group Model' is proposed which enables us to analyse the silo group as a whole easily, and to grasp the mechanical properties of them including the interactive effect between each structure. In this treatment, each silo and cross wall are replaced by the beam and the plate, respectively. By using this simple model, we carried out both static and dynamic analysis of the reinforced concrete silo group subjected to the static and dynamic lateral forces.

In the static analysis, the investigations are especially made upon the effect of numbers of silo, stiffness of cross walls and height of silos, which seem to have significant influences in the deformation and stress of them. In the dynamic analysis, on the other hand, the eigenvalue calculations are carried out and together with this, the dynamic response analyses under earthquake loadings are also carried out. As the result of these treatments, there prove to exist some mechanical characteristics which can not be drawn from the analysis of silos as the isolated structures, and the simple beam model proposed here prove to be effective to examine characteristics of silo group.

* The Technical Research Institute, Fujita Corp.

** The Institute of Industrial Science, University of Tokyo