

工業用原料サイロの構造特性に関する実験的研究

表 佑太郎 此上典文
茶谷文雄 鈴木哲夫

Experimental Study on Structural Behaviors of Iron Ore Storage Silos

Yutaro Omote Norifumi Konoue
Fumio Chatani Testuo Suzuki

Abstract

This paper discusses the structural characteristics of reinforced concrete iron ore storage silos. Experimental works were conducted on physical properties of iron ore materials, pressure measurements were made on walls and slabs inside silos, and vibration tests of silo structures under emptying and filling conditions of materials were performed. The test results were also compared with theoretical calculations.

概 要

本報告は、鉄鉱石などの工業用原料を貯蔵する実物の鉄筋コンクリート造サイロを対象として、内容物原料の物理的及び力学的試験、原料によるサイロの内圧測定、及び地盤とサイロ構造体の振動実験を行なった結果の報告である。実験結果のうち、内圧測定結果は、物性試験結果を基にして、既往の内圧計算式が適用できること、振動実験結果は、軸対称回転体モデルによる FEM 解析手法によって説明可能なことなどの知見を得た。

1. 序

国土の狭い日本に於いては、土地の有効利用と環境保全の立場からも、各種原料を貯蔵する為の大型サイロの建設要求は将来的にも必至であり、その計画、設計に際しては模型による室内実験と共に、実大サイロによる検証実験など資料の蓄積が必要なることは明らかである。今回、鉄鉱石などの工業用原料貯蔵サイロ（約3,000m³×3基）を用いて、物性試験、内圧測定及び振動実験を行なう機会を得たので、この実験と解析とを実施し、将来的見地で経済的かつ安全なサイロの構造設計手法を確立する為の一資料を得ることを目的とし、研究を行なった。

2. 実験用サイロの概要と実験概要

図-1に平面図を、図-2にA-A'断面図を示す。サイロの構造形式はRC造で、図-1のNo.2,3サイロは塔体、槽床版、基礎板が構造的に一体となっているのに対して、No.1の実験に供したサイロは、振動実験を考へて、あらかじめEXJで隣接サイロと縁が切れている。なおサイロの基礎はφ500のPC杭である。

実験時サイロ内原料は鉄鉱石（ハスマレーF、粒径10

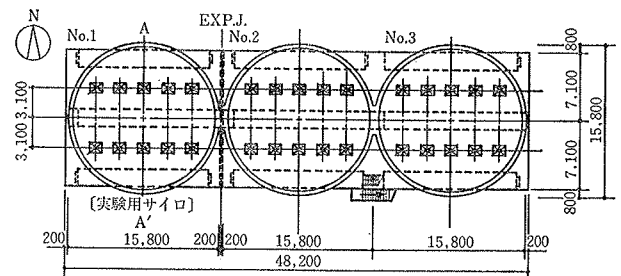


図-1 サイロ平面図 (GL+4900)

mm以下)で、その基本的な物性を同種の試料を用いて室内実験によって調査した。

内圧分布は満杯静置時、投入、切出時及び詰り対策用に取り付けられたラドコ噴射時などで測定した。振動実験は、常時微動測定と、起振機による強制振動実験とを各々No.1サイロの空と満杯時とで行なったが、その時No.2, No.3の両サイロは常に満杯状態であった。以下、これらの各実

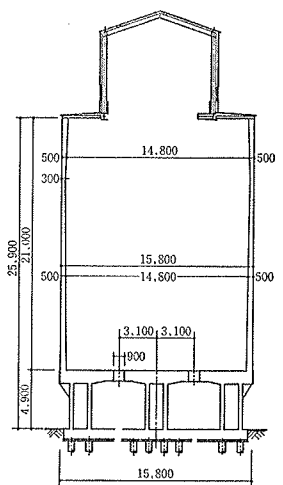


図-2 サイロ断面図

験結果とその解析結果とについて記す。

3. 地盤及び原料の性質

3.1. 地盤の動特性

調査項目は、弾性波試験と常時微動測定である。PS 検層による弾性波試験結果から、当地盤は図-3 に示すような GL-10 m 付近を境に、以深の元海底の砂礫層と以浅の埋土層からなる層構造と考えられる。次に、常時微動測定結果の1例として、埋土層の動特性を確認するためのスペクトル比を図-4 に示した。同図の 0.23 秒 (4.35 Hz) 付近のピークが表層の固有振動数と考えられ、これは GL-10 m 地点に単位振幅を有する波動が入射した場合の地表面の応答倍率を示した図-5 にみられる 0.22 秒 (4.55 Hz) のピークともよく対応している。

3.2. 鉄鉱石の物理的、及び力学的性質

実験に使用した鉄鉱石は、気乾状態であり、粒径はほぼ 10 mm 以下である。鉄鉱石の比重、含水比、単位体積重量、粒径分布、粘着力、及び内部摩擦角等の基本的な物性の調査結果を表-1、及び図-6 にまとめて示した。比重、含水比、及び粒径分布については、それぞれ JIS A 1202, A 1203, A 1204 に準拠した試験方法によって測定した。単位体積重量は、土の締固め試験に使用する 15 cm モールドを用いて、“ゆるい状態”と“密な状態”

深度	土質記号	土質名	層番号	層厚 (m)	S波速度 Vs(m/sec)	P波速度 Vp(m/sec)	Vp/Vs 比	ポアソン比 ν	地盤剛性率 $\mu = PV_s^2 \times 10^3 (\text{kg/cm}^2)$	地盤弾性率 $E = 2\mu(1+\nu) \times 10^3 (\text{kg/cm}^2)$
0		鉄 滓								
2.5		砂 礫 (埋土)	1	10	180	820	4.56	0.47	0.63	1.85
8.5		砂							$\rho = 1.9 \text{ t}$ 仮定	
10.8		砂 礫	2	—	410	2,000	4.88	0.48	3.26	9.65
15		砂 礫							$\rho = 2.1 \text{ t}$ 仮定	
20										
25										
30										

図-3 サイトの地層構造

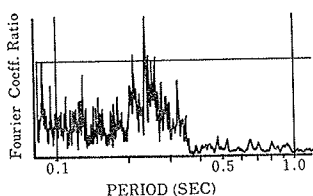


図-4 スペクトル比 (GLOM/GL-12M)

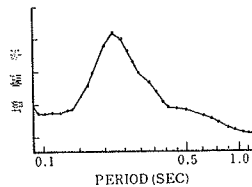


図-5 地表応答倍率

について測定するとともに、後述のせん断試験時において、鉄鉱石をせん断箱に詰めた状態（加圧前）についても測定した。なお、せん断箱は角型であり大きさは、内法寸法で縦 30 cm、横 30 cm、高さ 20 cm である。各状態に対応する試料の詰め方を以下に示した。

ゆるい状態：試料をハンドスコップで静かにモールドに入れ、圧力を加えないように試料の上面をならす。

密な状態：試料を3層に分けてモールドに入れ、各層ごとに重量 4.5 kg のランマーを 45 cm の高さから 67 回落下させて詰める。

せん断試験時：試料を3層に分けてせん断箱に入れ、各層ごとに一様に突き棒で突き固める。

粘着力、及び内部摩擦角は、試料の粒径が比較的大きいので、上記のせん断箱を有する下部可動型の大型一面せん断試験機を用いて求めた。せん断試験は、垂直荷重を 0.6, 1.2, 1.8, 2.4 kg/cm² の 4 段階として、せん断速度 1mm/分のひずみ制御方式で実施した。

3.3. 鉄鉱石の動的性質

サイロの動的解析上、原料の弾性係数の把握は不可欠である。このうち、せん断剛性の1評価法として弾性波試験による方法を記す。これは、室内試験として、試料を布製容器に充てんし、S波及びP波を発生させ、試料内に埋設してあるセンサーによって計測される弾性波速度に基づいて算出した下記の実験式から試料の垂直応力に対応したせん断剛性分布を求めるものである。

$$G_i = 5.09 \sigma_i^{1.054}$$

ここで G_i : 原料のせん断剛性 (t/m²)

σ_i : 原料内任意点の垂直応力 (gr/cm²)

上式の実機サイロへの適応性については、野積原料の常時微動測定あるいは、後述のサイロ内に鉄鉱石が貯蔵されている状態でのラドコ噴射時における鉄鉱石の弾性波速度などの結果を充分説明できるものである。

真比重	含水比	単位体積重量			粘着力	内部摩擦角
		モールドによる測定		せん断箱による測定		
		ゆるい状態	密な状態			
4.80	6.33%	2.05t/m ³	3.70t/m ³	3.07t/m ³	0.04kg/cm ²	38.8°

表-1 鉄鉱石の物性

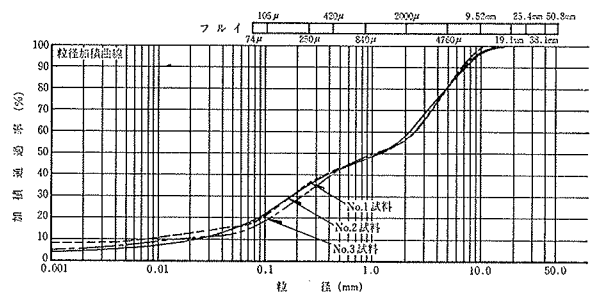


図-6 鉄鉱石の粒径加積曲線

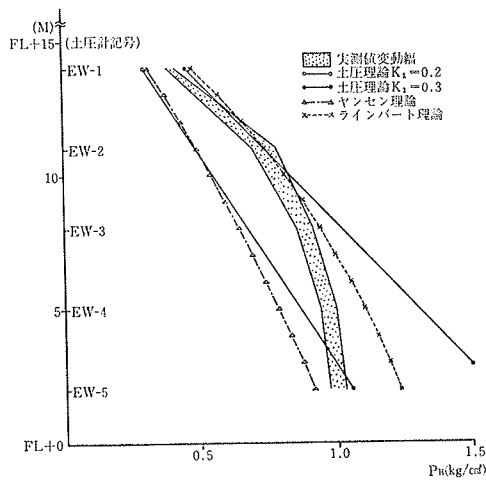


図-9 壁面圧力分布

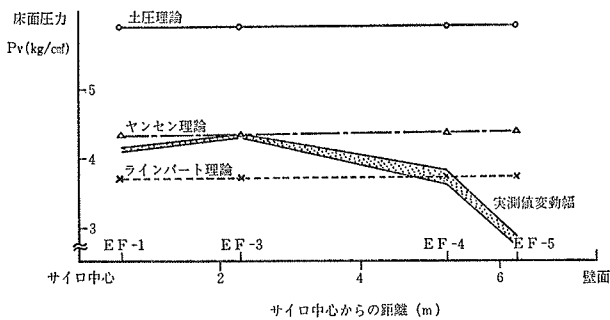


図-10 床面圧力分布

から壁面に近接した位置の内圧が中央付近に比較して低いことがわかる。これは壁面摩擦の影響によるものと思われる。図中に示した3本の計算値は、壁面圧力計算のときと同様の方法で計算した床面鉛直圧力であるが、サイロ中心付近ではヤンセン理論またはラインバート理論による値とほぼ近似している。

4.4. 切出時の内圧

今回の実験期間中における切出方法は、全期間を通して図-7の南側ゲートから行なわれ、切出量は満杯時の凡そ半分である。実験終了時のサイロ内の原料は北側から南側へ片流れ滞積状態であった。なお、壁面土圧計の位置は北側壁面にある。図-11に切出し開始初期の動的測定記録の内、最も圧力変化の大きいものの例を示す。壁面圧力は全体に満杯静置時に比べて圧力低下し、最大値を示すEw-4の記録では0.081kg/cm²で、これは静置時の最大値0.7kg/cm²の約10%である。一般に切出時の動的流動圧は静止時圧に対して割り増して考えるが、これは中央払い出しまは均等払い出し状態で、原料の流れが完全なマスフローの状態ではないとき、局部的にアーチの形成、崩壊によって起る場合であって、今回の実験の範囲とは異なり、結論づけられない。

切出時の圧力変動の内、ラドコシュート時の測定記録の例を図-12に示す。同図は切出し開始日のサイロ内原

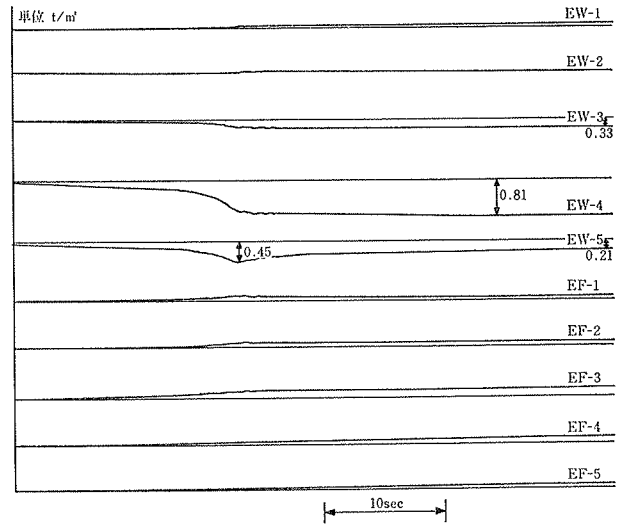


図-11 切出時の動的圧力変化

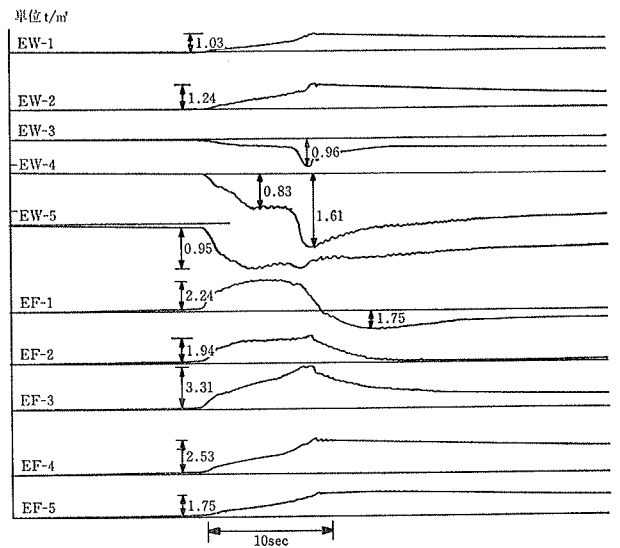


図-12 ラドコ噴射時の動的圧力変化

料が多い状態で、図-7のS-6を噴射した時のものである。図中原線より上が圧力増加を示すが、壁面のEW-3, 4, 5が圧力の減少を示し、床面に近いEW-1, 2及び床面土圧計のすべてが圧力の増大を示している。シュート時の圧力の大きな変化は約10秒程度の間を生じ、変化後の圧力は、変化前の値に戻らず、ある程度残留するのが特徴である。これはシュート時の圧力によって原料の粒子配列が変化すると思われる。図-12の圧力変動値を、満杯時最大圧力と比較すると、ラドコシュート時の壁面圧力変動量は10~23%、床面で5~8%程度であり、構造設計上特に問題となる値ではないと判断される。

4.5. 内圧測定のみとめ

今回行なった実験の範囲では、投入時の衝撃圧は認められなかったこと、満杯静置時圧力分布は既応の算定式で推定できること、切出時の動的圧力は、深槽で問題となるような過圧は発生しなかったこと、及びラドコ噴射

時の壁面圧力、床面圧力の増加は僅かであったことなどがいえよう。

5. サイロの振動実験とシミュレーション解析

サイロ筒体床部分に設置された2台の起振機(BCS-A-200型)の連動運転により、8Hzまでの水平方向正弦波加振を行ない、サイロおよび原料(鉄鉱石)の応答を測定した。鉄鉱石の貯蔵状態によって、空時および満杯時の2ケースについて実施した。写真-1に全景を図-13に加振位置と満杯サイロの場合の測定位置を示した。

5.1. 空サイロの振動実験

図-14にサイロ筒体部の変位応答共振曲線の1例を示す。同図は、全加振振動数範囲において起振機の偏心モーメントを200 kg・m(1台当りに統一換算したものである。4.4Hzと5.8Hzに共振振動数がみられるが、地盤調査結果から、4.4Hzの1次

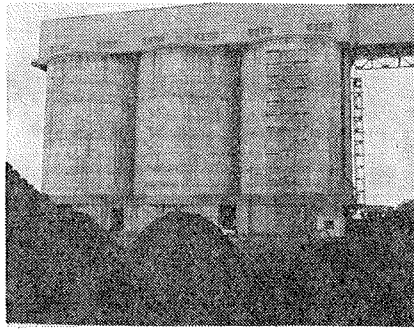


写真-1 サイロ全景

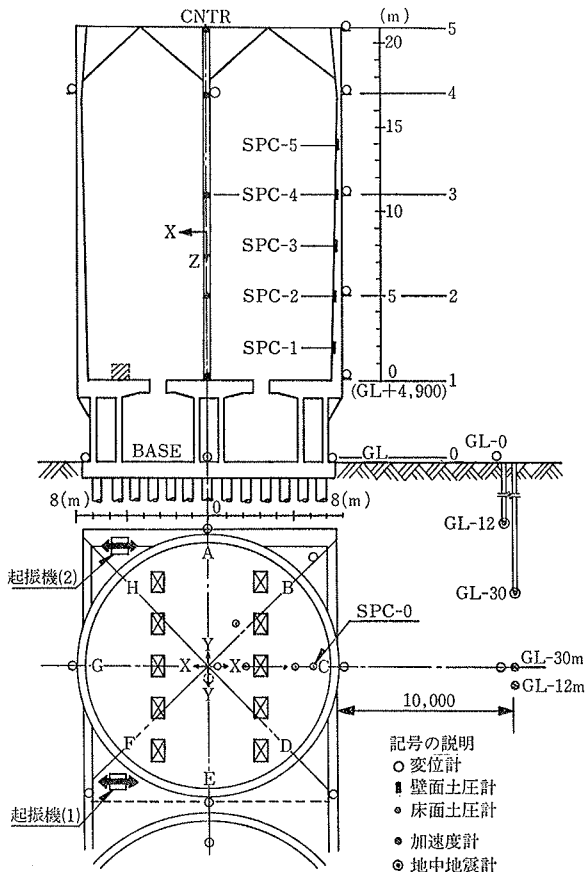


図-13 加振位置と測定点

共振点は、GL-10m以浅の表層地盤の振動が卓越するためであり、このサイロ構造物の固有振動数は、5.8Hzである。図-15は、5.8Hz時の応答モードを示した。なお、この時の減衰定数は、1/√2法から8.3%と得た。

5.2. 満杯サイロの振動実験

原料内の加速度計およびサイロ壁体の土圧計による測定項目が空サイロの場合よりも追加されている。図-16, 17にサイロ筒体変位および鉄鉱石中央部の加速度応答共振曲線を示す。2.1Hzと2.7Hzの応答モードは同形の

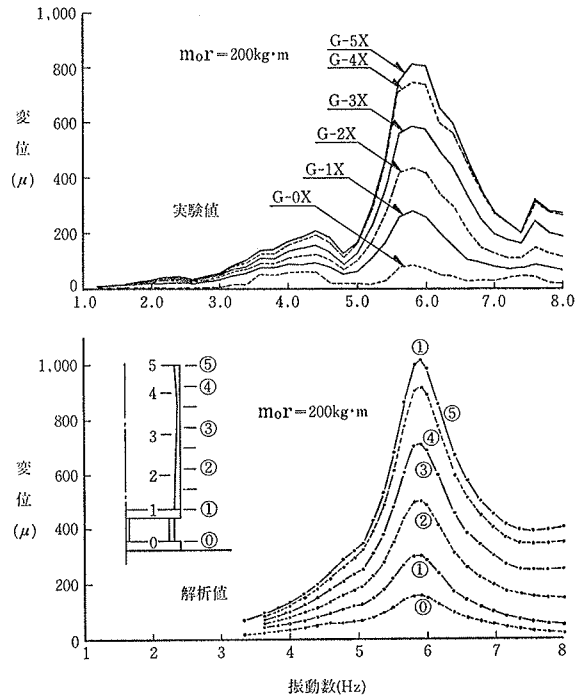


図-14 空サイロ変位応答共振曲線(筒体水平変位)

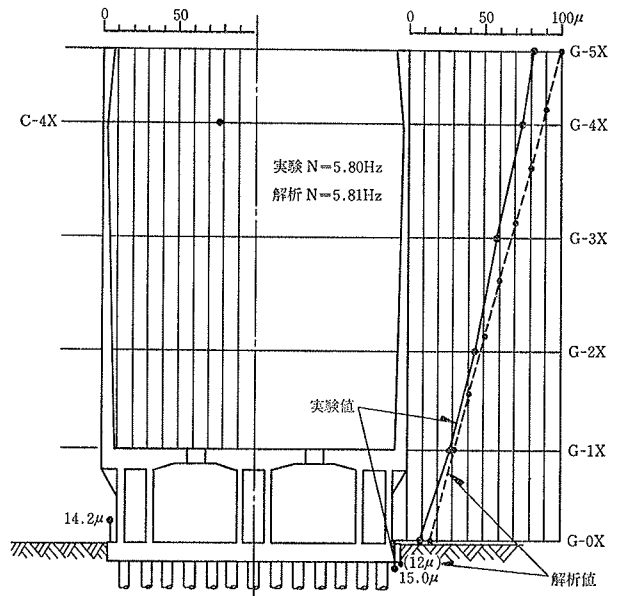
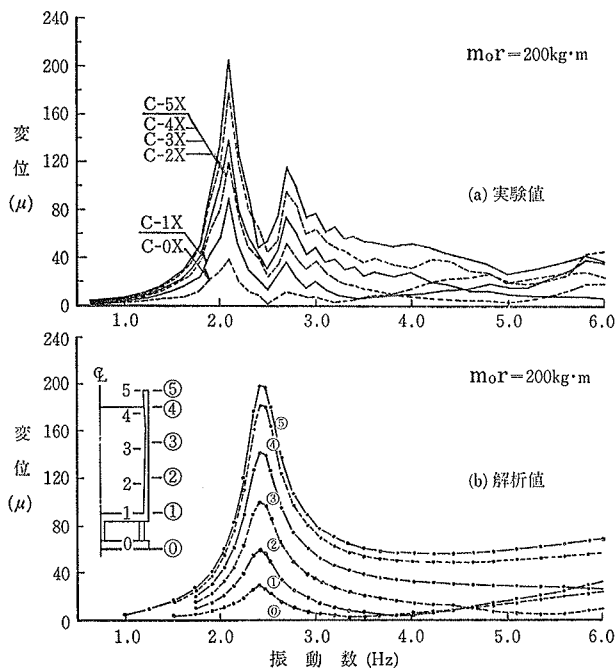
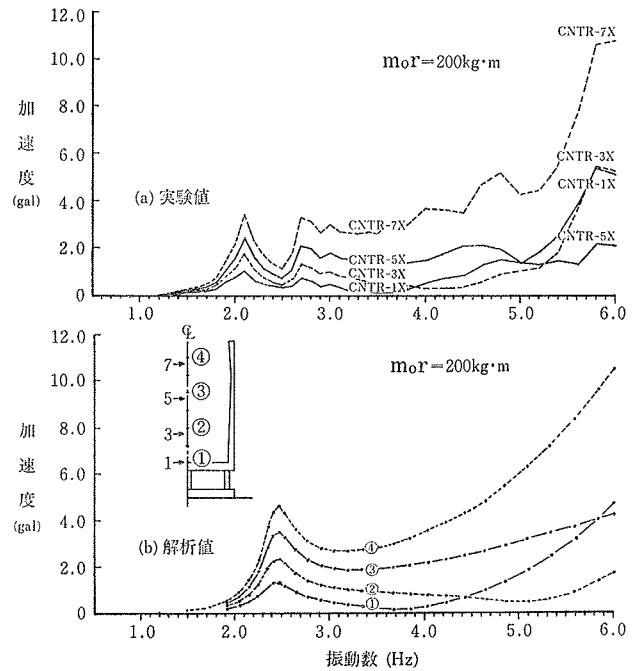


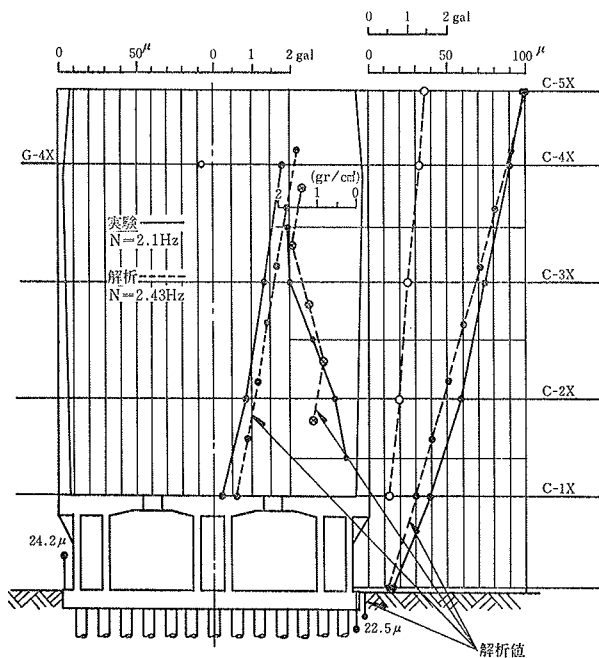
図-15 空サイロ応答モード ($m_0r=20 \text{ kg}\cdot\text{m}$)



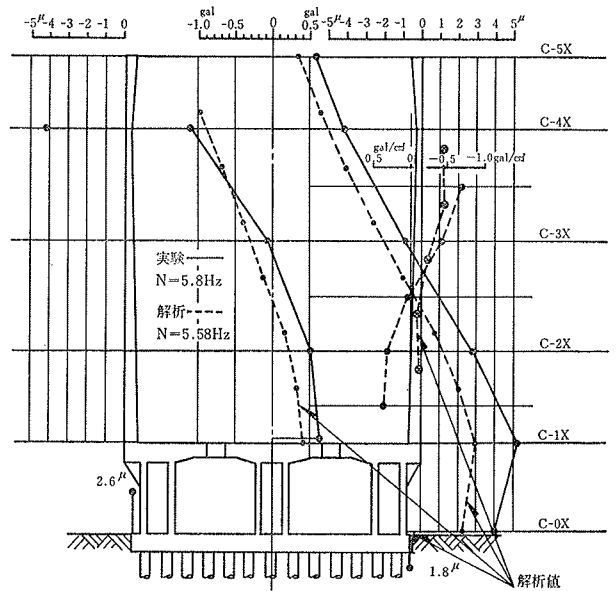
図一16 満杯サイロ変位応答共振曲線(筒体水平変位)



図一17 満杯サイロ加速度応答共振曲線(原料中央)



図一18 満杯サイロ応答モード($m_{0r} = 100 \text{ kg} \cdot \text{m}$)



図一19 満杯サイロ応答モード($m_{0r} = 20 \text{ kg} \cdot \text{m}$)

1次モードを呈し、図一18には2.1 Hz時のみを示した。
 図一19は、サイロと地盤との連成2次を示す5.8 Hz時の
 応答モードである。ここで、2.1 Hzと2.7 Hzの同一
 モードを有する二つの共振振動数について記す。これは、
 実験サイロ以外の2基のサイロにも同種の原料が貯蔵さ
 れているため、同様な振動系が2個近在することによる
 相互干渉が原因と考えられる。図一20, 21に、実験サイ
 ロと隣接サイロ筒体頂部での共振曲線と位相曲線を、次
 項での解析結果も併せて示した。なお、空サイロの振動

実験時にも他の2基のサイロには原料が充てんされてい
 したが、この場合には、各サイロの共振域が異なるため、実
 験結果には、隣接サイロの影響は殆んどみられなかった。

5.3. シミュレーション解析

振動実験のシミュレーションは、先づ試験サイロ単体
 の解析を文献一1で述べた軸対称回転体有限要素法によ
 り行なう。次に、隣接サイロの影響を考慮した簡単な力
 学系モデルを設定し実験で得られた応答特性に検討を加
 える。

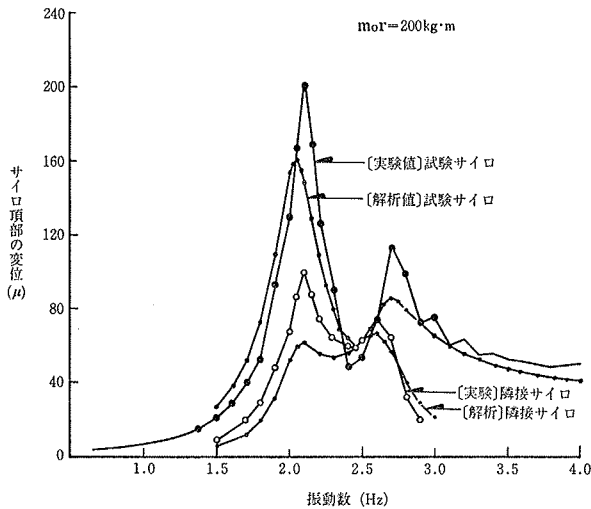


図-20 共振曲線の比較

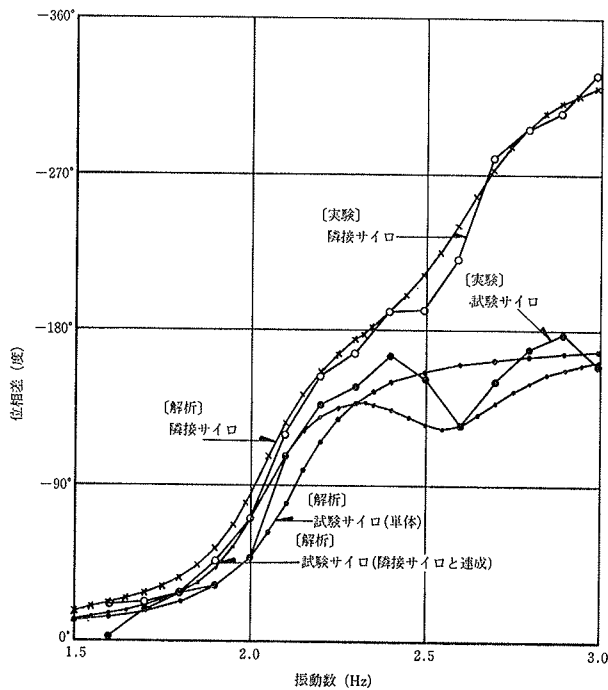


図-21 位相曲線

5.3.1. 単体サイロの解析 満杯サイロの場合の解析モデルを図-22に示す。サイロ筒体部、鉄鋼石は勿論のこと、排出部の壁、基礎スラブ、杭及び地盤をもすべて回転体要素として扱っておりそれら各部のモデル化の方針及び諸定数を一括して表-2に示す。なお、空サイロの場合は図-22での鉄鋼石がないだけで他は全く同一である。

(a) 固有振動数 表-3に固有振動数とモード減衰定数を実験値とともに示す。空の場合、解析値の1次(4.94 Hz)は地盤の変形が卓越し、2次(5.84 Hz)はサイロと地盤の連成モードで、これらは実験値とほぼ合致している。満杯の場合、2.43 Hzはサイロと地盤の連成1次、5.58 Hzは連成2次で、4.38 Hzは地盤変形が卓

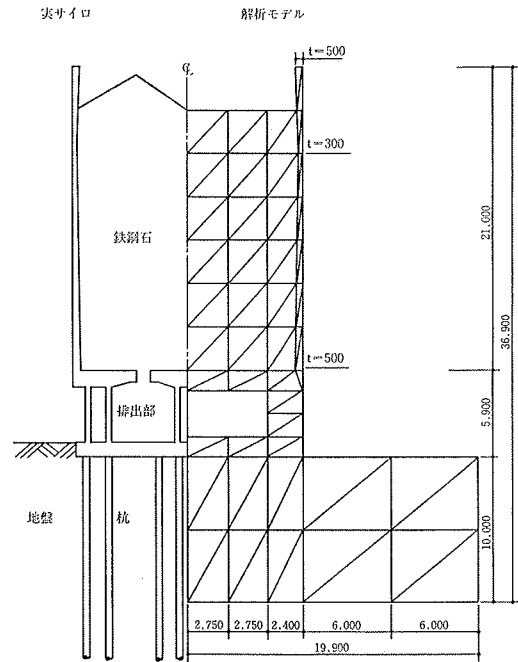


図-22 解析モデル

越するモードであるが、実験値と比べ若干の違いがみられる。

(b) 空サイロの応答 空サイロの場合の変位応答共振曲線を図-14に示す。実験と同様、ベーススラブにのみ外力を与え求めたものである。また図-15中には5.8 Hzに於ける高さ方向変位モードの解析値を併記した。共振曲線の比較及び応答モードの比較より、空の場合、解析値は実験値を良くシミュレートしていると言えよう。

(c) 満杯サイロの応答 満杯サイロの場合の応答共振曲線を図-16, 17に示す。図-16, 17はそれぞれサイロ筒体部の変位及び原料中央部の加速度を示している。解析と実験との共振曲線(図-16(a)と(b)及び図-17(a)と(b))を比較すると実験結果はほぼ同一振動モードで2.1 Hzと2.7 Hzとにピークがみられたのに反し、解析結果は2.43 Hzでのピークしかみられず実験結果を完全にシミュレートすることは出来ないが、最大応答変位は両者ほぼ等しいと言えよう。図-18, 19中に、解析での応答変位、加速度及び動的圧力モードを併記した。両図より高さ方向の応答モードは解析値と実験値両者が比較的良く合致している。なお、動的圧力は近似的にRCサイロ近傍の鉄鋼石要素の半径方向応力(σ_r)より求めている。

5.3.2. 隣接サイロの影響 満杯サイロの場合、サイロを単体として扱った解析では実験結果を良くシミュレートすることは出来なかった。3.2.でも述べたように試験サイロの極く近傍にほぼ同じような動特性をもつ振動系(隣接サイロ)があれば、表層地盤を媒体として両者が連成することは充分考えられよう。ここでは図-23に示

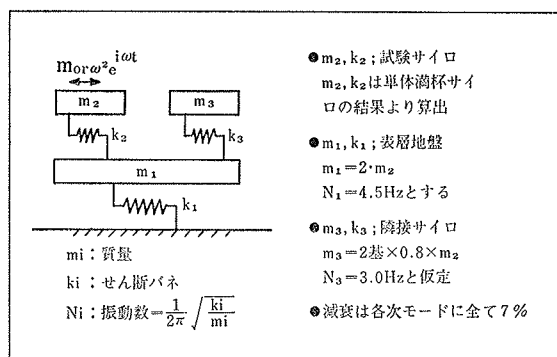
各部名称	モデル化及び諸定数決定の方針	せん断剛性 G (t/m ²)	ポアソン比 ν	密度 (t/m ³)	減衰定数 h
R.C.サイロ筒体部		0.9×10 ⁶	0.167	2.4	0.03
鉄鋼石	せん断剛性は次式より算定 G=5.09×σ _v ^{1.054} (t/m ²) σ _v =垂直応力(gr/cm ²) 減衰はσ _v に応じ変化させる。 密度は弾性波試験時の測定値を用いた。	上から順に (1) 0.025×10 ⁶ (2) 0.080×10 ⁶ (3) 0.137×10 ⁶ (4) 0.196×10 ⁶ (5) 0.255×10 ⁶ (6) 0.315×10 ⁶	0.440 0.440 0.440 0.440 0.440 0.440	2.4 2.4 2.4 2.4 2.4 2.4	0.13 0.12 0.11 0.10 0.09 0.08
排出部分の壁	円筒形にモデル化した部分の弾性変形が、実際の壁の全変形(曲げ, せん断, 回転)にほぼ等しくなるよう, G, ν等を決める。	0.248×10 ⁶	0.167	1.3	0.03
地盤	表層地盤の動特性を参考にしている。	4000.	0.470	1.5	0.13
杭	地盤を考へない杭のみの時のせん断及び全体回転変形量をもとに、排出部の壁と同様、円筒形にモデル化する。	0.175×10 ⁶	0.05	0.41	0.03

表一2 解析に用いた諸定数

	実験値			解析値	
	振動数	減衰		振動数	減衰
空の場合	1次	4.4 Hz	10.2%	4.94 Hz	11.6%
	2	5.85	8.3	5.84	6.5
	3	7.6	—	7.98	10.2
満パイの場合	1次	2.1 Hz	* 4.1%	2.43 Hz	6.7%
	2	2.7	* 3.1	4.38	12.9
	3	4.4	—	5.58	12.5
	4	5.8	—		

*. 共振曲線に山わかれがみられる
一. 算出不能

表一3 固有振動数と減衰定数



図一23 隣接サイロを考慮した振動モデル

す最も簡単な力学系モデルにより実験で得られた共振曲線の解釈を試みる。図一23で示したモデルでのサイロ頂上における共振曲線及び位相曲線をそれぞれ図一20, 21中に併記した。隣接サイロを考慮したことにより試験サ

イロの1次共振点は、単体解析時に比べ低振動数に移行した2.7 Hz付近にも共振点をもつようになり、図一16, 17より解析結果は実験結果により近づく。もちろん図一23に示した力学系モデルの定数の設定次第で解析結果は多少変化しようが、以上の検討から、実験での共振曲線の山わかれの現象はほぼ隣接サイロの影響と断定できよう。

5.3.3. まとめ

今回の振動実験では隣接サイロの影響がみられたが、大局的には単体サイロとしての応答解析では実験結果を捉え得ると考えられ、ここで示した解析法の有効性が確認された。

6. 結び

本報では鉄鉱石を内容物とするRC造サイロの内圧性状や振動性状について、同種試料の室内実験物性値を基にした実験結果とその解析結果とについて述べた。内圧と地震時水平力との組合せ応力下での一般の貯蔵サイロを経済的かつ安全に設計する為には、工業用原料に限らず種々の内容物の動的物理性質を知り、適切な解析手法によってその妥当性を検証することが不可欠である。本報はそのような資料の蓄積を進めていく上の一資料を提供したものである。

謝辞

本実験の計画、実施に際して、(株)神戸製鋼所加古川工事事務所の小野一政所長はじめ皆様の御協力を得ました。ここに謝意を表します。実験図面作製等については本店建築設計三部の協力を得、また特に内圧測定については東京本社建築技術部 佐藤 寛課長が担当されました。あわせて謝意を表します。

参考文献

- 1) 表, 此上, 茶谷, 鈴木: 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, (1983), pp. 15~22