

石炭焚実証試験サイロの構造特性に関する研究（その2）

——振動実験と解析——

此 上 典 文 鈴 木 哲 夫
表 佑 太 郎 渡 辺 清 治

A Coal Storage Silo for Coal-fired Proving Test Plant (Part 2)

——Vibration Tests and Theoretical Calculations——

Norifumi Konoue Tetsuo Suzuki
Yutaro Omote Seiji Watanabe

Abstract

In this report (Part 2) the authors discuss the results of forced vibration tests using shakers and simulation analyses of the coal storage silo described in the previous paper (Part 1). Vibration tests were carried out on such conditions as only the foundation completed during construction, the empty silo before filling of coal, the half-full silo during filling, and the silo full of coal. The vibrational characteristics of the silo structure at small deflection were grasped experimentally regarding items such as natural frequency, damping coefficient, vibration mode shape, etc. An axisymmetric finite element method was used for elastic response analyses of the silo empty and full-loaded. The test results were simulated well for the principal first vibration mode, which is the most important in earthquake-resistant design.

概 要

本報告（その2）は、（その1）で記した石炭サイロの起振機による強制振動実験結果とそのシミュレーション解析結果について記述したものである。振動実験は、建設途上の基礎盤だけの状態、石炭投入前の空サイロ、投入途中の半杯サイロおよび全量投入後の満杯サイロの各状態において実施し、微小振幅レベルでの固有振動数、減衰定数、振動モードなどの振動性状を実験的に明らかにした。シミュレーション解析では、空および満杯サイロについて軸対称回転体有限要素法による弾性解析を行なって、実験結果との比較検討をした。石炭の諸定数は、動的三軸圧縮試験などの物性試験結果に基づいて決定した。この結果、本解析法によって耐震設計上重要な1次共振点付近の応答性状については、実験結果を充分シミュレートでき得ることが確認され、石炭サイロの有効な設計手法の一つとして本解析法は実用的であると考えられる。

1. 序

本報告（その2）は、石炭サイロの構造特性に関する一連の研究のうち、サイロ構造体と石炭との連成系における動的特性の実験的把握および実験結果のシミュレーション解析について記述したものである。

振動実験では、サイロ基礎盤上に設置した起振機によってサイロ構造体を水平方向に正弦波加振を行ない、サイロ筒体—石炭—基礎盤—鋼管杭—地盤などが連成した微小振動レベルでの振動性状を実験的に把握した。

シミュレーション解析では、サイロ筒体をソリッド要

素の軸対称回転体モデルとして扱い、有限要素法による弾性解析を行ない、実験結果との比較検討をした。ここで特に石炭の諸定数については、振動実験後に本石炭サイロから直接採取した試料の物性試験結果に基づいた数値を用いた。また、筒体部分をシェル要素として扱った場合の解析結果の一部も示した。

2. 振動実験の概要

振動実験は、石炭サイロの形態が異なる次の4状態について順次実施した。

(1) 基礎盤の振動実験（昭和56年10月実施）

- サイロ地上部分の筒体工事前で基礎盤だけの状態
- (2) 空サイロの振動実験 (昭和57年6月実施)
サイロの石炭量が零の状態
 - (3) 半杯サイロの振動実験 (昭和58年2月実施)
サイロ内の石炭量が全貯炭量の約半分 (3,000 t 程度) の状態
 - (4) 満杯サイロの振動実験 (昭和58年2月実施)
サイロ内の石炭量が目標とする約 6,000 t (全貯炭量) の状態

図-1に、サイロ基礎盤上に設置した2台の起振機的位置と杭の配置を示した。この起振機は、BCS-A-200型であり、同図のXおよびY方向各々に対して2台同期運転による

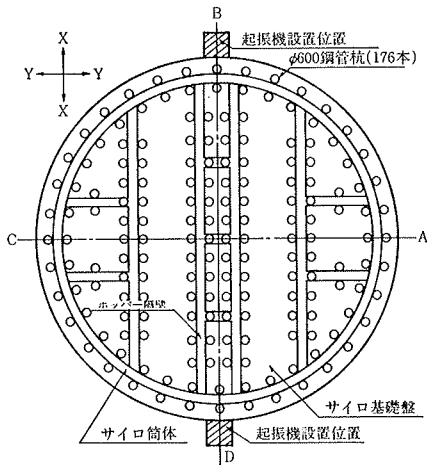


図-1 起振機設置位置と杭の配置

る水平方向正弦波加振実験を主として行なった。加振方法は振動数の低いほうから高いほうへステップごとに上げていく方法とした。次に測定位置については実験の種類によって各々異なるが、一例として満杯サイロ(Y方向加振)の場合を図-2に示した。測定項目はサイロ筒体の変位および加速度、石炭内加速度、サイロ筒体およびホッパー部振動時圧力、基礎盤の弾性変形および周辺地盤の変位などである。このうち、サイロ内石炭の加速度測定は、小型の高感度歪ゲージ式加速度計を鋼製カプセル内にセットし、これを石炭積付時に遠隔操作によるロボット機械を用いて所定の位置に設置したものを使用した。

3. 実験結果とその検討

当地盤では、サイロ建設工事着工前に実施したPS検層と常時微動測定の結果、0.7 Hz 付近と 2~4 Hz 付近に卓越振動数があり、第3種から第4種地盤に相当することがわかっている。

3.1. 基礎盤の振動実験

図-3に基礎盤上の代表点でのX方向加振時の変位共振曲線を示した。3.8 Hz と 6.8 Hz 付近に共振振動数があり、3.8 Hz 付近においてはスウェイ振動が卓越し、ロッキング振動はほとんど認められない。6.8 Hz 付近では、上下振動に顕著なピークがみられ、この時の基礎盤の上下方向振動モードは図-4に示すように剛体的な回

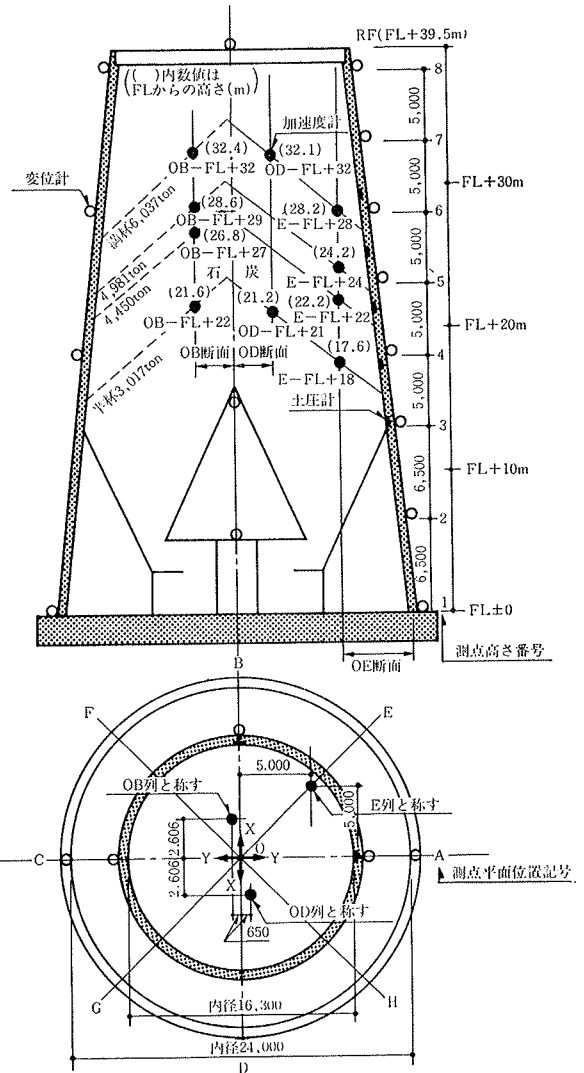


図-2 振動測定位置 (満杯サイロの場合)

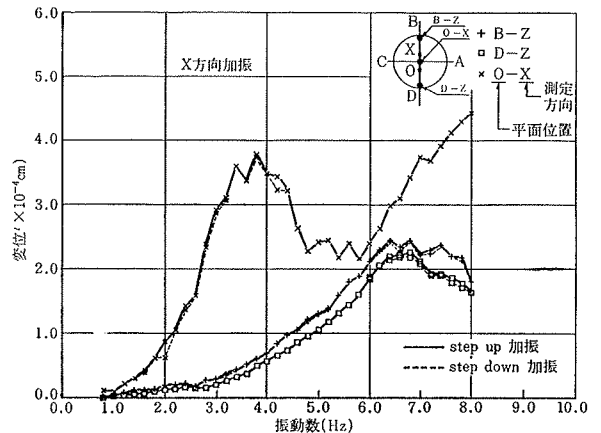


図-3 基礎盤の共振曲線 (偏心モーメント 20 kg・m)

転振動を呈している。この振動数が杭-基礎-地盤が連成した1次の固有振動数である。この基礎盤は円形対称であり、杭配置が図-1のようにXとY方向に方向性を有しているが、X, Y 両方向での固有振動数、振動モードなどの振動性状はほとんど変化がないことが判明した。

また図-3には起振機の回転数を低いほうから高いほうへ上げる加振に引き続いて実施した逆の低いほうへ下げていくステップ加振結果も示しているが、この実験の振幅レベルでは、上りと下りの応答結果には変化はみられず、地盤の非線型性は認められなかった。

3.2. 空サイロの振動実験

これは、石炭積付前での石炭が空の状態での実験である。図-5には、一例として筒体C列での

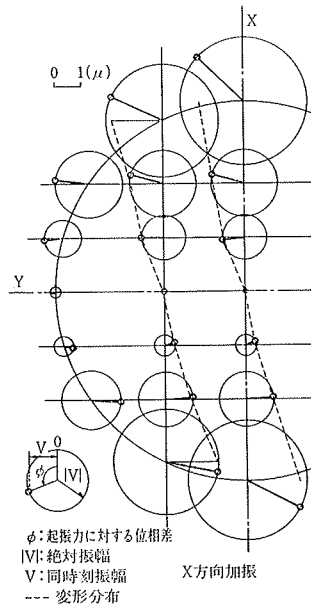


図-4 基礎盤モード

Y方向加振時の水平方向の変位共振曲線を後述の解析結果とともに示した。同図の応答変位は起振力をすべて1tに規準化してある。なお、以後の共振曲線もすべて同表示である。3.5 Hz付近でピークを示す振動数がこのサイロ構造物と地盤が連成した1次の固有振動数である。

また、図-6は各共振点付近でのスウェイ、ロッキングおよび筒体の弾性変形量の各割合を示したもので、2.7 Hzでは全体の振動量に対するスウェイ振動量が5割近く占めており、これは地盤振動が卓越したものである。一方、3.5 Hzでも筒体の弾性変形量が約3割程度であり、空の状態でのサイロ構造物はスウェイ・ロッキング主体の剛体的な振動性状を呈していることがわかった。

3.3. 半杯サイロの振動実験

これは、石炭投入過程において、石炭積付量が目標の全貯炭量の半分の約3,000tに達した時点で投入をやめ、この状態での実験である。実際の積付量は3,017tであり、この時の石炭錐の概略形状は図-2に示したとおりである。実験結果は、次項の満杯サイロの場合とほとんど同傾向であるため、詳細は省略し表-1に全実験ケースについての固有振動数と減衰定数を一括して示した。

3.4. 満杯サイロの振動実験

石炭を目標とする全量積付けた時の石炭錐形状は概ね図-2に示すとおりであり、実際の貯炭量は6,037tであった。なお、サイロ基礎盤および地上部構造物(筒体、ホッパーなど)の重量はそれぞれ約3,000t,約5,000tである。図-7にY方向加振時のサイロ筒体A列の変位、図-8には石炭の加速度についての共振曲線を解析結果とともに示した。図-9は共振振動数の2.2 Hzと4.7 Hz

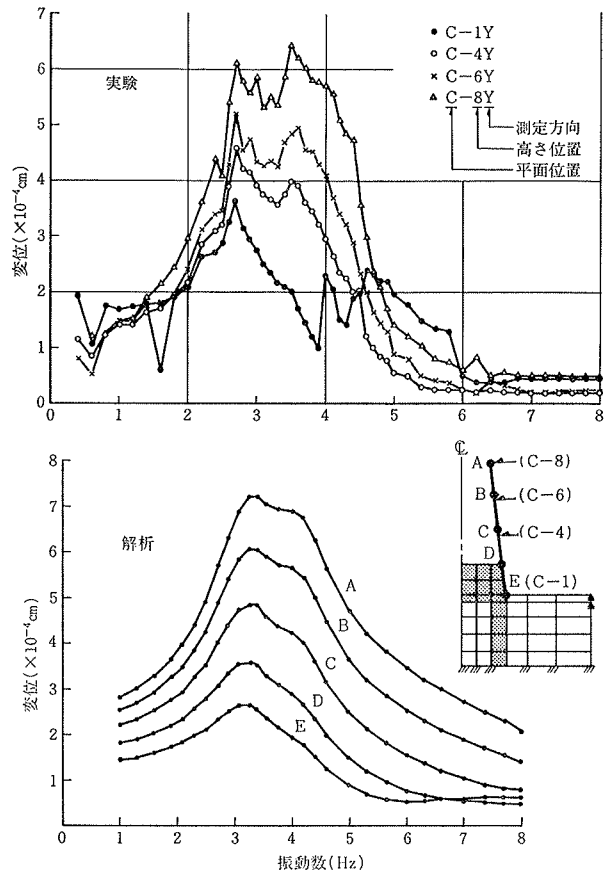


図-5 サイロ筒体変位共振曲線 (空サイロ, Y方向)

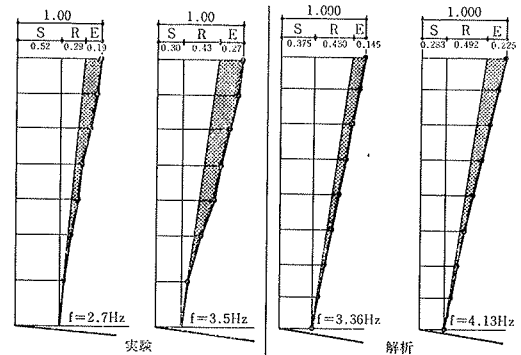


図-6 応答モード (空サイロ, Y方向)

での振動形である。2.2 Hzでは、サイロ筒体および内部の石炭がともに1次の変形分布であり、振幅もほぼ同量である。振動成分の比率は、図-10に示したようにスウェイ、ロッキング振動が全体の約7割を占めていて、サイロ筒体の弾性変形は3割程度である。満杯サイロの場合も空、半杯サイロと同様、剛体的な振動性状である。

次に、4.7 Hzにおいては石炭中央頂部付近の応答が非常に大きく、また位相も他の測点と異にしているなど炭錐頂部付近のみが局部的に共振しているようであるが、石炭内部の下方あるいはサイロ筒体に近づくにつれて応答量は急激に小さくなる傾向がみられる。また、回転中

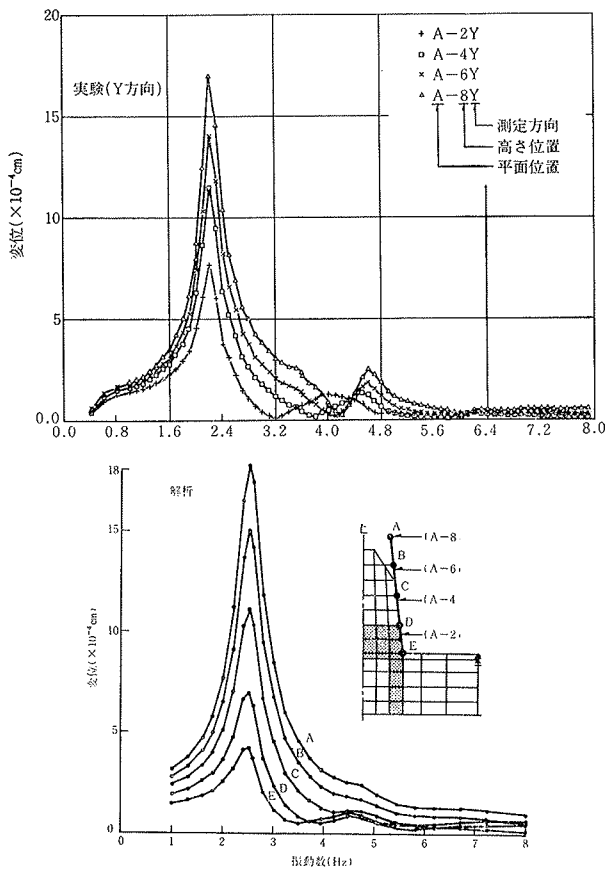


図-7 サイロ筒体変位共振曲線 (満杯サイロ, Y方向)

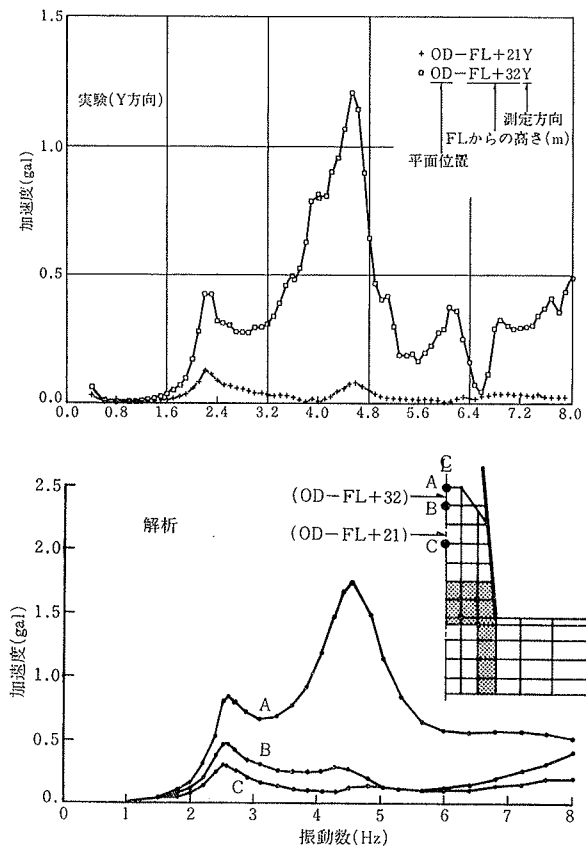


図-8 石炭加速度共振曲線 (満杯サイロ, Y方向)

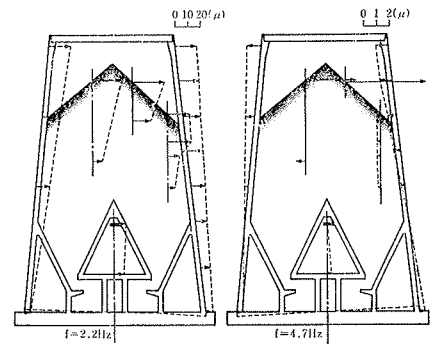


図-9 振動形 (満杯サイロ, Y方向)

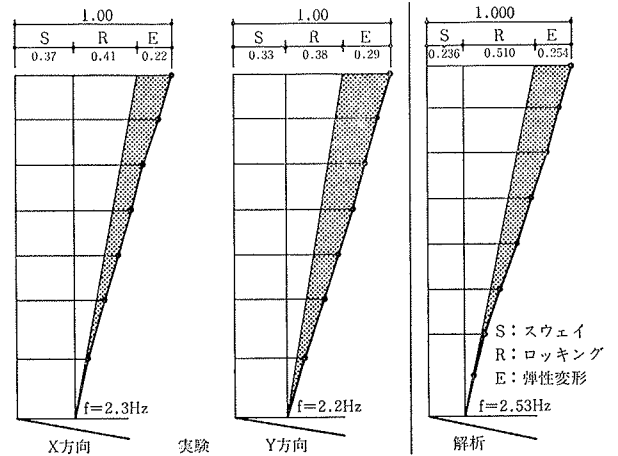


図-10 応答モード (満杯サイロ)

心が石炭塊の中心付近にあるような2次の振動モードである。半杯, 満杯サイロ何れの場合も1次共振点ではサイロ構造物と地盤が連成したスウェイ, ロッキング主体の1次の変形分布を示し, 2次共振点では内部の石炭(表面中央付近)が大きく振動することが判明した。

4. 解析結果とその検討

シミュレーション解析は先づ Solid 要素を用いた軸対称回転体有限要素法¹⁾により行なった。解析モデルと入力諸定数を図-11に示す。ホッパー部および杭についてはせん断剛性と曲げ剛性とが実物とほぼ等価になるよう定めている。また, 石炭の剛性, 減衰性は図-12に示した動的三軸試験結果のうち歪レベルが 10^{-4} の場合を参考にして決定したもので, 剛性は上載圧により変化させた。

空サイロおよび満杯サイロ (但し後述する CASE B) の場合について実験と解析結果との比較を図-5, 6, 7, 8 および10に示した。空サイロおよび満杯サイロ両者とも共振振動数, 応答振幅および応答モードについては実験と解析とが良く対応している。

解析結果のうち満杯サイロでの筒体頂部の変位共振曲線について, 石炭頂部の要素剛性 (G_1) のみを変化させた場合の比較を図-13に CASE A~C として実線で示した。これは積付け状況の不確かさを模擬したもので

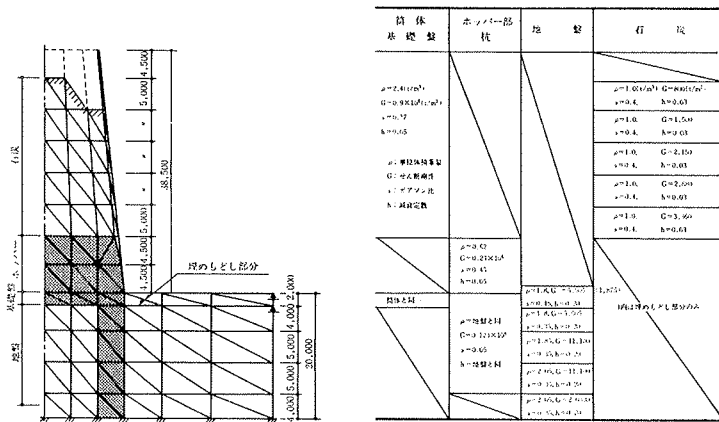


図-11 解析モデルと入力諸定数

石炭積付状態	共振モード	実験値				解析値	
		X方向		Y方向		解析値	
		振動数 (Hz)	減衰定数 (%)	振動数 (Hz)	減衰定数 (%)	振動数 (Hz)	減衰定数 (%)
基礎盤	1次	3.8	15~20	3.8	15~20	4.42	—
	2次	6.8	15~20	7.0	15~20	7.66	—
空	1次	2.7	15	2.7	15	3.36	18.3
	2次	4.1	12	3.5	20	4.13	17.0
半杯	1次	2.5	6~9	2.5	9~12	—	—
	2次(*)	4.6	9	4.6	6~8	—	—
満杯	1次	2.3	6~7	2.2	6~7	2.53(**)	9.4(**)
	2次(*)	4.7	4	4.7	4~5	4.51(**)	10.5(**)

(*) 石炭が大きく振動するモード
 (**) 4章で示したCASE-Bでの計算値

表-1 固有振動数と減衰定数一覧表

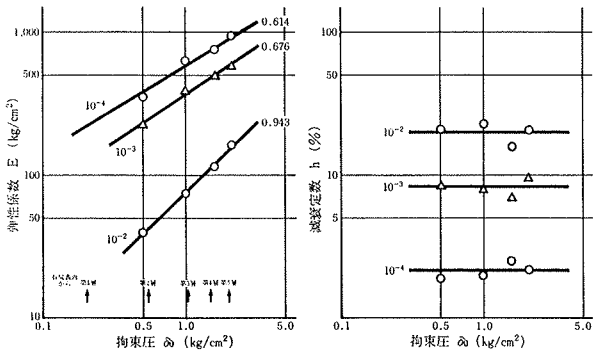


図-12 石炭の拘束圧とせん断剛性，減衰定数との関係

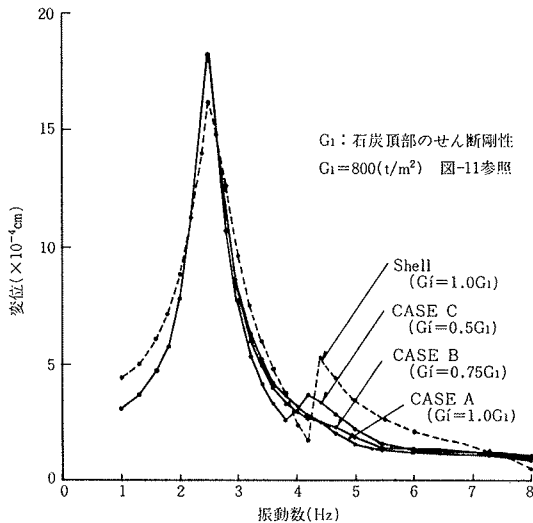


図-13 サイロ筒体変位共振曲線の比較 (満杯サイロ)

あり、一次共振点付近の応答は3ケースでほとんど差はないが、石炭頂部の剛性を低下させるにつれて4~5 Hz付近で石炭頂部の応答が増加し、結果的にその振動数付近で筒体の応答も大きくなると言った連成振動の効果が顕となる傾向にある。そこで次に、筒体部のみをShell要素として軸対称回転体有限要素法解析²⁾を試みその結

果を同図中に破線で示した。筒体部を曲げ変形も考慮したShell要素とすると、4~5 Hz付近において石炭頂部が動きやすくなる傾向がみられ、筒体をSolid要素にした場合に比べ石炭および筒体の応答とも増加している。満杯サイロの場合、特に耐震設計上重要となる一次共振点(≒2.5 Hz)付近の応答特性についてはいずれの解析法によっても差は小さくその結果は実験結果と良く一致している。しかし実験において石炭頂部の応答が急増している4.5 Hz近傍での石炭~筒体連成挙動については解析手法の違いや石炭剛性の仮定の仕方により応答結果も異なり、今後更に詳細な検討が必要であろう。

5. むすび

石炭サイロの動的挙動に関して実験的に貴重なデータが多々得られたと考える。また、それらはシミュレーション解析を通じほぼ把握し得た。今後、更に詳細な解析を通じ石炭サイロの動的応答特性を検討し、耐震設計に役立たせる所存である。

なお、本研究は石川島播磨重工業(株)との共同研究であり、実施にあたっては、関西電力(株)石炭炭実証試験関係者各位には多大な御厚情を賜りました。ここに深く感謝致します。また、当所振動研究室 若松邦夫、土質基礎研究室 石井雄輔、両研究員の御協力に対し謝意を表します。

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
- 2) 後藤, 白砂, 河村, 徳永: 液体-構造物-地盤連成系の地震応答解析の手法について, 大林組技術研究所報, No. 27, (1983), pp. 54~58