

# 石炭サイロの境界部非線形性を考慮した地震応答解析に 関する研究 (その1)

武田 寿一 伊藤 雅保

## Earthquake Response Analysis for Coal Storage Silo Considering Inelastic Behavior at Boundary Surface Between Silo Structure and Coal (Part 1)

Toshikazu Takeda Masayasu Ito

### Abstract

The main objectives of the study reported here are ascertainment of the response characteristics of a coal storage silo during severe earthquake excitations. In order to carry out dynamic analysis of a coal-silo structure coupled system, an inelastic analysis mathematical model employing a three-dimensional finite element method is developed. By using a joint element at the boundary surface between silo structure and coal, it is made possible to consider the discontinuity of displacements of the two. This analysis technique is examined by conducting the dynamic inelastic analysis using a model of a large-sized coal storage silo. Based on the results, it is thought that the dynamic behaviors of a coal storage silo are influenced by the condition of the boundary surface.

### 概 要

本研究の主目的は、強震時における石炭サイロの動的挙動を把握することである。石炭-サイロ塔体連成系の動的解析を行なうために3次元F.E.M.を用いた動的非弾性解析法を開発した。本解析法では、サイロ塔体と石炭との境界面にJoint Elementを用いることによって、境界面における両者の変位の不連続性(境界面での滑り、離れ、再付着等)を考慮できるようになっている。この解析手法を用いた計算例として、大型石炭サイロ(内容量6,000t相当)をモデル化したものについて、境界面の条件を変えた3ケースの動的解析を行ない、境界面で非線形性を考慮するか否かによって解析結果が大きく影響されることを示した。

### 1. まえがき

近年、我が国では石油の代替エネルギーとして石炭の利用が見直され、石炭を貯蔵するための施設として大型石炭サイロの建設が有望視されている。

強震時における石炭サイロの動的挙動として、塔体と内容物(石炭)との境界面において、両者が離れたり、滑ったりする現象が生じることが予測される。

そこで、上記の現象を考慮した動的解析を行ない、石炭サイロの動的挙動を把握するために、3次元F.E.M.を用いた解析法を開発することにした。

この解析法では、サイロ塔体と石炭を六面体要素でモ

デル化し、サイロ塔体と石炭との境界面にJoint Elementを用いている。このことによって、弾性解析時でも境界面で両者の変位の不連続性を考慮することが可能であり、非弾性解析時には境界面でサイロ塔体と石炭との離れ・再付着、滑りの現象を考慮することができる。

### 2. 解析上の仮定とモデル化

#### 2.1. サイロ塔体と石炭のモデル化

サイロ塔体と石炭とは弾性体であると仮定し、任意形状の六面体要素を用いてモデル化を行なう。

#### 2.2. サイロ塔体と石炭との境界面のモデル化

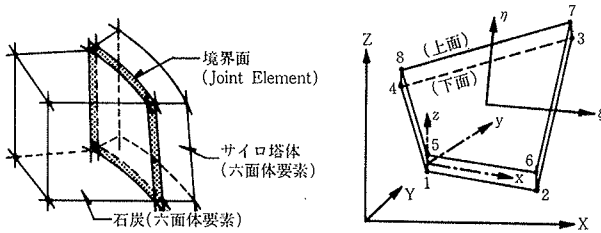
サイロ塔体と石炭との境界面のような潜在的に不連続

な面を有限要素でモデル化するために Joint Element を用いる。

Joint Element (以後 J. E. と略す) とは図-1 (a) に示したように、不連続面を表現するために考えられたものであり、不連続面の両側に節点を配置した 8 節点要素である。J. E. の応力状態によって、滑ったり、離れたりする現象をモデル化することができる。

J. E. については次のように仮定する。

- J. E. は平板状であり、板厚は零である。従って、J. E. の質量は零となる。
- J. E. は面に垂直な方向の引張力には抵抗せず、離れ現象を生じる。このとき J. E. 内の応力は零とする。
- J. E. は面に垂直な方向の圧縮力と面内方向のせん断力には抵抗する。



(a) 境界面のモデル化 (b) 座標系のとり方

図-1 Joint Element

### 3. Joint Element の剛性

Joint Element の剛性行列の導き方を Goodman<sup>2)</sup> の方法を用いて以下に示す。

#### 3.1. 座標系と変位関数

図-1 (b) に示したように、局部座標系  $-xyz$  と固有座標系  $-\xi\eta$  をとれば、両者の間に次の関係式が成立する。

$$\begin{cases} x = h_1x_1 + h_2x_2 + h_3x_3 + h_4x_4 = \sum_{i=1}^4 h_{1i}x_i \\ y = h_1y_1 + h_2y_2 + h_3y_3 + h_4y_4 = \sum_{i=1}^4 h_{2i}y_i \end{cases} \dots\dots(1)$$

ここで、

$$\begin{aligned} x_i, y_i: & \text{節点 } i \text{ の局部座標系での座標値} \\ h_1 &= (1-\xi)(1-\eta)/4, \quad h_2 = (1+\xi)(1-\eta)/4 \\ h_3 &= (1+\xi)(1+\eta)/4, \quad h_4 = (1-\xi)(1+\eta)/4 \end{aligned}$$

次に、変位が J. E. 内で直線的に変化するものと仮定すると、変位関数は次の式で表わされる。

$$u = \sum_{i=1}^4 h_{1i}u_i, \quad v = \sum_{i=1}^4 h_{2i}v_i, \quad w = \sum_{i=1}^4 h_{3i}w_i \dots\dots(2)$$

ここで、 $u, v, w$  は  $x, y, z$  一方向の変位成分を示し、 $u_i, v_i, w_i$  は節点  $i$  の変位である。

#### 3.2. J. E. の相対変位

J. E. の上面と下面の相対変位  $W (u_0, v_0, w_0)$  として

$$\begin{cases} u_0 = B \cdot u^* \\ v_0 = B \cdot v^* \\ w_0 = B \cdot v^* \end{cases} \dots\dots(3)$$

を考えることにする。ここで、

$$B = [-h_1, -h_2, -h_3, -h_4; h_1, h_2, h_3, h_4]$$

$$u^* = \{u_1, u_2, \dots, u_8\}^T, \quad v^* = \{v_1, \dots, v_8\}^T,$$

$$w^* = \{w_1, \dots, w_8\}^T$$

である。すると、

$$\{W\} = [N] \cdot \{u\} \dots\dots(4)$$

ここで、

$$\{W\} = \begin{Bmatrix} u_0 \\ v_0 \\ w_0 \end{Bmatrix}, \quad [N] = \begin{pmatrix} B & 0 & 0 \\ 0 & B & 0 \\ 0 & 0 & B \end{pmatrix}, \quad \{u\} = \begin{Bmatrix} u^* \\ v^* \\ w^* \end{Bmatrix}$$

#### 3.3. J. E. の応力

J. E. の応力  $P$  を次のように定義する。

$$\{P\} = [k] \cdot \{W\} \dots\dots(5)$$

ここで

$$\{P\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{Bmatrix}, \quad [k] = \begin{pmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & k_z \end{pmatrix}$$

なお、 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z; k_x, k_y, k_z$  は各々  $x, y, z$  一方向の J. E. の応力と剛性である。

#### 3.4. J. E. の剛性行列

局部座標  $-xyz$  の J. E. の剛性行列 ( $k_J$ ) は次の式で与えられる。

$$k_J = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [N]^T \cdot [k] \cdot [N] \cdot \det|J| \cdot d\xi \cdot d\eta \dots(6)$$

なお、全体座標系  $-xyz$  での剛性行列 ( $k_J$ ) は(6)式の  $k_J$  を座標変換すれば求められる。

### 4. 全体系の運動方程式と解析手法

#### 4.1. 全体系の運動方程式

個々の構成要素の剛性行列、質量行列を求め、それらを重ね合わせることによって、全体系の運動方程式が求められ、一般式として次のように表わすことができる。

$$M \cdot \ddot{x}_t + C \cdot \dot{x}_t + K \cdot x_t = F(t) \dots\dots(7)$$

ここで、

$M$ : 全体系の質量マトリックス

$C$ : 全体系の減衰マトリックス

$K$ : 全体系の剛性マトリックス

$F(t)$ : 全体系の外力ベクトル

$\ddot{x}_t$ : 全体系の加速度ベクトル

$\dot{x}_t$ : 全体系の速度ベクトル

$x_t$ : 全体系の変位ベクトル

なお、

$$M = \sum_{i=1}^N [m_o]_i \quad [m_o]_i : \text{個材の質量行列}$$

$$K = \sum_{i=1}^N [k_e]_i + \sum_{i=1}^M [k_j]_i \quad [k_e]_i : \text{個材の剛性行列}$$

$$C = \sum_{i=1}^N (\alpha_{ei}[m_o]_i + \beta_{ei}[k_e]_i) \quad \alpha_{ei}, \beta_{ei} : \text{個材の減衰係数}$$

$$\alpha_{ei} = h_{ei} \cdot \omega \quad h_{ei} : \text{個材の減衰定数}$$

$$\beta_{ei} = h_{ei} / \omega \quad \omega : \text{基本円振動数}$$

$$[k_j]_i : \text{J.E. の剛性行列}$$

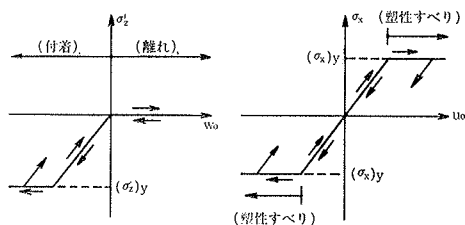
4.2. 数値積分法と非線形解法

今回は、(7)式の数値積分法として、Newmar  $k-\beta$  法を用いた。また、サイロ塔体と石炭との境界面での滑り、離れ・再付着の非線形性を考慮した解析は初期応力法を用いている。

4.3. 離れ・再付着の判定とその後の処理

サイロ塔体と石炭との境界面に設けた J. E. の各応力成分の復元力特性を図-2のように仮定したうえで、境界面での離れ・再付着の判定とその後の処理を次の手順に従って行なった。なお、圧縮降伏や滑りについても同様な処理を行なえばよい。

- (1) 離れ・再付着の判定は J. E. の Gauss Point 位置での値を用いて行なう。
- (2) まず、ある J. E. において面に垂直な方向の応力  $\sigma_z$  が  $\sigma_z > 0$  (引張状態) となったときに、その J. E. 面でサイロ塔体と石炭とは離れたものとし、J. E. 内の応力を 0 とする。そのためには、J. E. 内の除去すべき応力と等価な節点力を求め、それらを解除すればよい。
- (3) 次の Time step において、離れている J. E. の面に垂直な方向の相対変位  $w_0$  が  $w_0 > 0$  であれば、その J. E. は離れたままとする。このとき、J. E. の応力が 0 となるようにし、J. E. に応力を負担させない。
- (4) さらに、ある Time step まで進んだときに、離れていた J. E. の相対変位  $w_0$  が  $w_0 \leq 0$  となったならば、そのときには、サイロ塔体と石炭とは再付着したものとし、以後 J. E. に応力を負担させる。



(a) 鉛直応力—相対変位関係 (b) せん断応力—相対変位関係

図-2 復元力特性

5. 計算例

本解析手法を用いた計算例として、図-3に概略の形状を示した RC 造石炭サイロ (内容量 6,000 t 相当) モデルを用い、次の3 case について動的解析を行ない、応答量の比較・検討を行なった。

- Case 1: J. E. を用いない場合で、弾性解析
- Case 2: J. E. を用いた場合で、弾性解析
- Case 3: J. E. を用いた場合で、非弾性解析

5.1. 解析モデル

構造物の対称性を利用して、全体の 1/2 部分を図-3に示したような要素分割でモデル化している。

(1) サイロ塔体 塔体は高さ 41 m, 上部半径 7.9 m, 下部半径 12 m で壁厚が 0.4~0.7 m の RC 造円錐シェル構造である。その材料定数として次の値を用いた。

- ヤング率  $E = 2.1 \times 10^6 \text{ t/m}^2$
- ポアソン比  $\nu = 0.17$
- 単位重量  $\rho = 2.4 \text{ t/m}^3$
- 減衰  $h = 0.05$

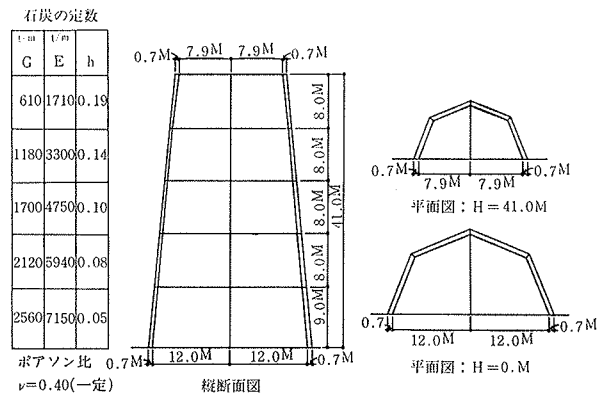


図-3 解析モデルの概略

(2) 石炭 石炭はサイロ内を完全に満たしているものとし、その材料定数は図-3に示したように、高さ方向に変化させた値を使用した。

(3) Joint Element サイロ塔体と石炭との境界面に設けた J. E. のバネ係数として、高さ方向に変化させた次の値 (順序は上部から下部へ) を使用した。

$$k_x = k_y = 610; 1,180; 1,700; 2,120; 2,560 \text{ t/m}^3$$

$$k_z = 1,710; 3,300; 4,750; 5,940; 7,150 \text{ t/m}^3$$

ここで、 $k_x, k_y$ : J. E. の面内せん断剛性係数  
 $k_z$ : J. E. 面に垂直方向の剛性係数

5.2. モード形と固有振動数

サイロ塔体+J. E.+石炭の場合を代表例として選び、刺激関数値の大きなモードを選んで、概略のモード形と固有振動数を図-4に示した。

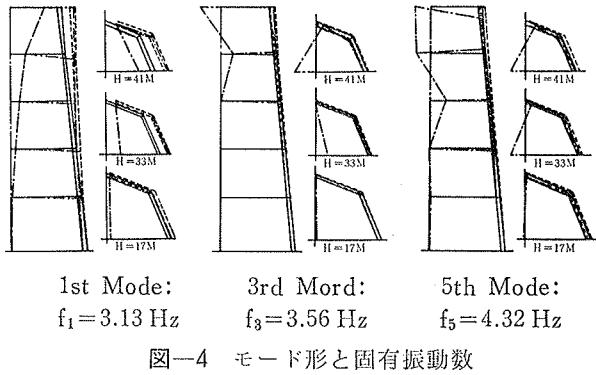


図-4 モード形と固有振動数

### 5.3. 入力加速度と時刻割り

入力加速度波形として、海岸沿いの砂質地盤である八戸港湾での記録（十勝沖地震）HACH 68 NS ( $\alpha_{\max} = 225 \text{ gal}$ ) を採用し、その波形を図-5 に示した。なお、応答計算ははじめの4秒間について行なっている。

また、時刻割り ( $\Delta t$ ) は、弾性解析の場合が  $\Delta t = 1/200$  秒、非弾性解析の場合が  $\Delta t = 1/500$  秒とした。

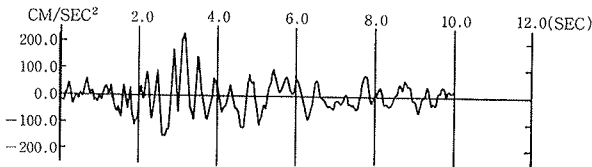


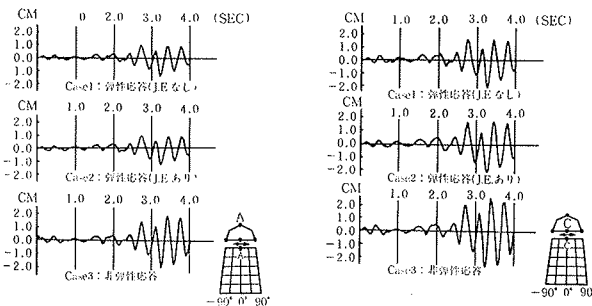
図-5 入力加速度波形：HACH 68NS

### 5.4. 解析結果

図-6 は石炭サイロ頂部の2点 (Point A, C) における変位応答波形を各ケースごとに示しており、図-7 は石炭サイロの3点 (Point A, B, C) における最大応答変位の高さ方向分布の比較を示している。

また、図-8 は石炭サイロの頂部の2点 (Point A, C) における加速度応答波形を各ケースごとに示しており、図-9 は石炭サイロの3点 (Point A, B, C) における最大応答加速度の高さ方向分布の比較を示している。

さらに、図-10(a)は J. E. 面に垂直方向の応力の変動



(a) Point A (b) Point C

図-6 変位応答波形の比較

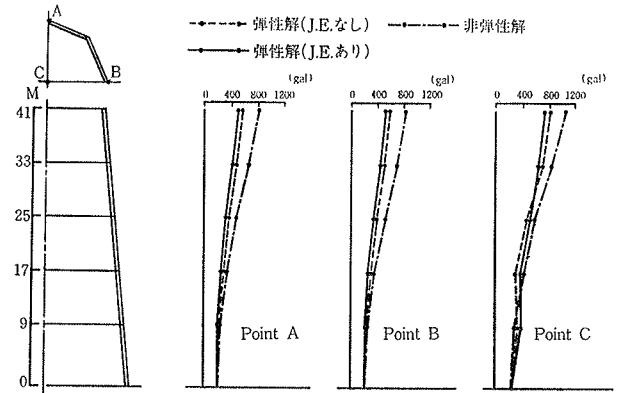


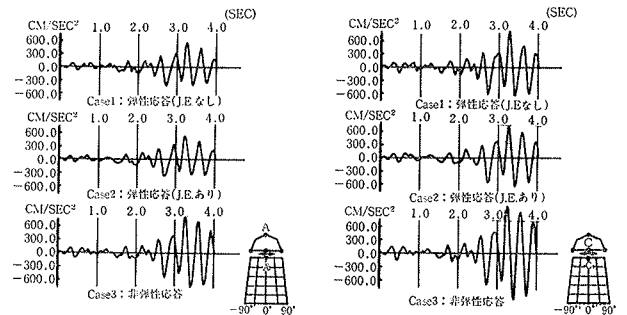
図-7 最大応答変位の比較

波形を、図-10(b)は J. E. 面内せん断応力の変動波形を、それぞれ高さ方向の5点 (Point B-1~B-5) について示している。なお、図-10において応力が零となっている部分は、サイロ塔体と石炭が境界面で離れた状態であることを意味している。

### 5.5. 解析結果のまとめ

八戸港湾での地震記録 HACH 68 NS ( $\alpha_{\max} = 225 \text{ gal}$ ) を入力地震波として用いた、RC 造大型石炭サイロの動的解析結果 (図-6 ~ 図-10) をまとめると、次のようなことが言える。

(1) 弾性解析の場合 (case 1 と case 2) を比べると、変位、加速度の両者とも



(a) Point A (b) Point C

図-8 加速度応答波形の比較

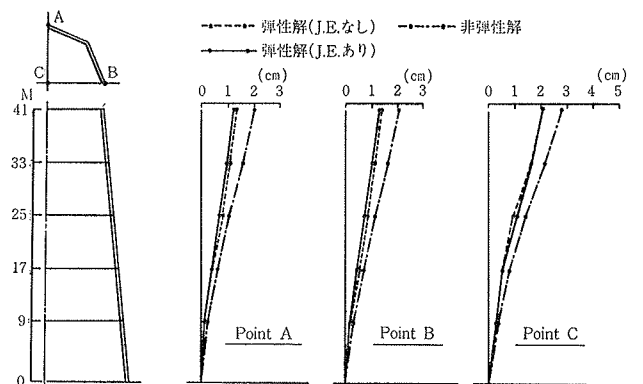
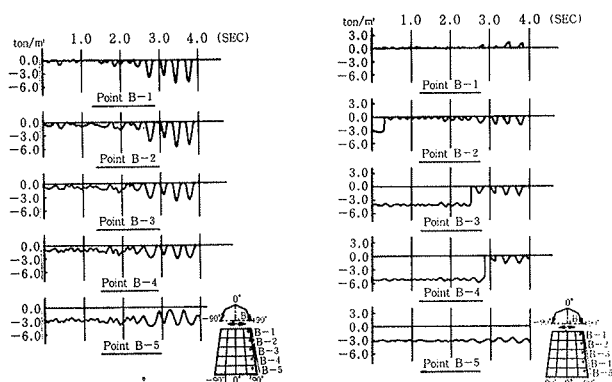


図-9 最大加速度応答の比較



(a) 垂直応力 (b) せん断応力

図-10 J. E. 応力の変動

弾性解析 (J. E. あり) ≒ 弾性解析 (J. E. なし) となっており, J. E. を用いても用いなくても得られた応答値はほぼ同じである。

(2) 弾性解析 (case 2) と非弾性解析 (case 3) の比較では, サイロ塔体, 石炭の変位, 加速度の両者とも

非弾性解析 > 弾性解析

となっており, J. E. の非線形性 (離れ・再付着, 滑り) を考慮したことによって, 応答値が大きくなっている。

(3) 非弾性解析 (case 3) の場合, J. E. 面に垂直方向の変動応力の最大値はサイロ上部 (Point B-2) で生じており, 石炭自重による最大静的応力 (Point B-5 の  $t=0$  における値) の約 2 倍の大きさとなっている。

また, J. E. 面内方向のせん断応力の変動幅は小さく, 再付着後のせん断応力は石炭自重による最大静的せん断力 (Point B-4 の  $t=0$  における値) に比べてかなり小さな値となっている。

(4) サイロ塔体と石炭との離れ・再付着現象は高さ方向で 5 層に分割した J. E. の上部 4 層について生じ, 最後まで離れなかったのは最下層のみであった。なお, 今回の解析では圧縮降伏, 塑性滑り現象は生じなかった。

## 6. 結 び

石炭サイロの塔体と石炭との境界面において, 滑り, 離れ・再付着等の現象を考慮した動的解析法を開発し, それに基づいた電算機プログラムの開発を行なった。

また, それを用いて, RC 造大型石炭サイロ (内容量 6,000 t 相当) の地震応答解析を行なうことによって, 離れ・再付着現象が応答結果に与える影響を検討した。その結果, 今回の解析例では, サイロ塔体と石炭との境界面での非線形性を考慮した場合には弾性解析の場合よりも大きな応答値 (変位, 加速度) が得られた。

最後に, 本解析手法は石炭サイロの動的解析を行なうためには有効な解析手法であると思われるので, 今後は実験結果のシミュレーション解析などを行なうことによって, その有用性を示すつもりである。

## 参考文献

- 1) R. E. Goodman, R. L. Taylor and T. L. Brekke: A model for the mechanics of jointed rock, Proc. ASCE, 94, SM 3, (1968)
- 2) M. A. Mahtab and R. E. Goodman: Three dimensional finite element analysis of jointed rock slopes, Proc. 2nd Congr., ISRM, Beograd, (1970)
- 3) O. C. Zienkiewicz, S. Valliappan and I. P. King: Stress analysis of rock as a 'no tension' material, Geotechnique, (1968)
- 4) O. C. Zienkiewicz, S. Valliappan and I. P. King: Elasto-Plastic solutions of engineering problem initial stress, finite element approach, Int. Journal for Numerical method in Engineering, Vol. 1 (1969)
- 5) 中川, 武田, 伊藤: 三次元有限要素法による振動解析, 大林組技術研究所報, No. 7, (1973), pp. 51~55
- 6) 秋野, 中川, 武田, 伊藤: 相互作用を考慮した建家と地盤との動的解析に関する研究 (その 5 基礎面と地盤との離れを考慮した動的解析法), 日本建築学会大会学術講演梗概集, (昭和53. 9), pp. 653~654
- 7) 土岐, 佐藤, 三浦: 強震時における地盤と構造物の間の剝離と滑動, 土木学会論文報告集, No. 302, (1980. 10), pp. 31~41
- 8) 土岐, 三浦, 大竹: 3次元有限要素法による構造物—地盤系の非線形震動解析, 第30回応用力学連合講演会, pp. 109~110