

石炭焚実証試験サイロの構造特性に関する研究（その1）

——全体概要と圧力測定——

表 佑太郎 中川 恭次
末 兼 正 純 林 誠 一
(本社 エンジニアリ) (本社 エンジニアリ)
ング事業部 ング事業部

A Coal Storage Silo for Coal-fired Proving Test Plant (Part 1)

——Outline and Test Program of Silo and Results of Pressure Measurements——

Yutaro Omote Kyoji Nakagawa
Masazumi Suekane Seiichi Hayashi

Abstract

A coal storage silo of 6,000-tons capacity for coal-fired proving test plant was completed at Himeji No. 1 Power Station of Kansai Electric Power Co. in June 1982. In order to obtain relevant informations for future development of structural design of silos, the following series of tests have been going on since 1982 with completion planned for 1987: (1) measurements of pressures and observations of flowability of coal inside silo, (2) vibration tests of the silo structure by use of electric shakers, and (3) laboratory tests of various brands of coal properties.

This report, Part 1, discusses the outline of the silo structure, and as a portion of the results obtained to date, mainly the measurements of pressures during discharge of coal into the hopper.

概 要

昭和57年6月に当社は関西電力(株)姫路第一発電所の石炭焚実証試験設備のうち、6,000t貯炭サイロを建設した。これを機会に同サイロを使用して昭和57年9月より石炭サイロの構造設計資料を収集する目的で以下の諸試験を実験している。(1) 圧力・応力測定と流動性状の調査、(2) 起振機による強制振動実験、及び(3) 各種銘柄の石炭物性試験。

本報告では、サイロの概要、試験の全体概要を紹介すると共に、現在迄に得られた結果の一部として、主に石炭の払い出しに伴う流動時圧力測定結果とその考察、及びサイロ内石炭の流動性状について述べた。

1. 序

海外からの輸入炭に大きく依存する我が国の火力発電所用貯炭設備では、環境保全、敷地の有効利用、石炭の品質管理と運転の自動化、経済性などの総合的評価においてサイロ方式の有用性が最近認識されつつある。一方、大型貯炭サイロ建設の実績に乏しい我が国での石炭サイロの構造設計を遂行するに当り特に配慮しなければならない事項として、(1) 海外炭に依存するが故に、銘柄の異なる各種石炭の性質を出来るだけ多く知ること、(2) 安定した石炭の供給と品質管理の為に、目詰りのない円滑な払い出しが保証できること、及び、(3) 地震多発国で

あるが故に、サイロの耐震性能を確保して周辺機械装置も含めたシステム全体の安全を確保すると共に、大地震に対してはサイロ構造体の脆性破壊を防止することが大切であり、その為にはまず地震時における地盤も含めたサイロ構造体の内容物である石炭との連成振動性状を十分把握する必要があること、などが考えられよう。

勿論この他にも防災上の問題として、長期貯炭に伴うサイロ内石炭の昇温、ガス濃度、炭塵爆発などに対する諸問題も、構造的見地から解明すべきこともあるが、本論の主題とは異なるのでここでは省略する。

さて、前記三つの問題点については従来より室内模型実験や理論的な提案が国内外でなされているが、実機レ

- (3) 石炭投入前の空サイロ振動実験; (昭和57年 6月)
- (4) 石炭半杯, 満杯サイロ振動実験; (昭和58年 2月)

3. 圧力測定結果と考察

3.1. 測定方法

サイロ構造体の施工中に, 壁内面及びホッパー表面に土圧計設置用の箱抜きを施し, 完成後に表面をステンレスライニングした土圧計 (共和電業製) を埋設した。測定点数は壁面16箇所, ホッパー部とコーン部に19箇所の総計35箇所であり, その配置を図-3に示す。

測定器は圧力の絶対値と, 長期間に亘る経時変化を測定する目的でスキャナーを介して万能デジタル測定器 (UCAM-8B) を, 又, 衝撃圧力や流動時圧力など動的圧力を連続的に測定する目的で動的歪測定器を介して熱ペン型オシログラフを, 随時切りかえながら併用した。

尚, 圧力測定と同時に石炭圧による構造体各部の応力測定及び壁厚内の温度勾配測定も行なったが, 本報告ではこれらの結果は省略する。

3.2. 積付時衝撃圧力

現在迄に測定された石炭投入時のホッパーに作用する最大衝撃圧力はコーン頂部 (POA-1) で約 0.33 kg/cm^2 であり, この値は後述する静置時圧力や流動時圧力に較べると小さな値である。従って石炭落下による衝撃圧力を設計上特に配慮する必要はなさそうである。

3.3. 満杯静置時圧力

ここでは石炭投入開始後一度も払い出すことなく満杯 (6,000 t) まで連続して積付けを完了した後で払い出しを開始する以前の状態で壁面圧力を満杯静置時圧力と定義する。図-4に第2炭, 第3炭での壁面圧力の高さ方向分布を示す。データに若干のばらつきはあるものの, 大旨積付け深さに応じた圧力分布である。図中点線で示したのは, 物性試験結果を参考にして石炭の単位体積重量 $\gamma = 0.95 \text{ t/m}^3$, 内部摩擦角 $\phi = 35^\circ$ として土圧理論による圧力計算値を壁面垂直圧力に換算したもので圧力係数 ($K = \text{水平圧}/\text{鉛直圧}$) を $K = 0.27$ (主動圧力係数) と,

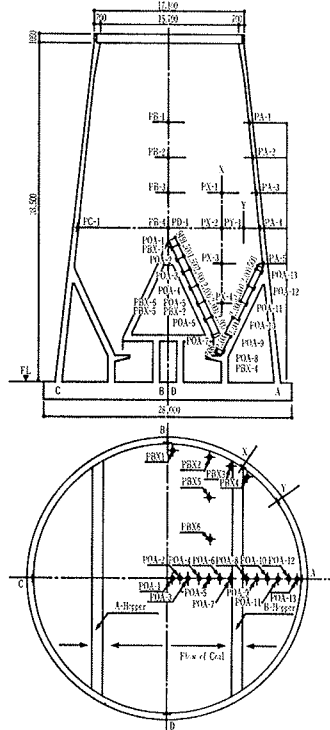


図-3 土圧計の配置

$K = 0.43$ (静止圧力係数)

とした場合である。今回の測定では後者の方が測定結果に近い。ホッパーについては後述の流動時圧力と関連して述べる。

3.4. 流動時圧力

本サイロでの通常の払い出し方法は2条ある直線スリットホッパーの内一方のホッパーを一定時間運転した後 (以後これを1サイクルと称す), 他方のホッパーに切りかえ, これを交互に繰返しながら全体として均等に払い出しを行なう。払い出し量は約 60 t/hr . で原則として1日に約7時間運転して夜間は休止する。

本報では, 第2炭での試験期間中に満杯静置状態で11日間放置した後の払い出し時測定の場合について述べる。

図-5には圧力変動記録の例として, 払い出し開始直後の2サイクル運転時のホッパーでの代表例を示す。

同図に見るように石炭流動時の圧力は時々刻々に増減するが, 一般的な変化の様子は以下の通りである。

- (1) 払い出し口付近ではフィーダーの通過時に増減する。
- (2) ホッパー頂部で圧力が激減する時にはそれより下の位置で圧力が増加し, 逆に下部の圧力が減少する時にはそれより上部の圧力が徐々に増加する。これは部分的なアーチの形成, 崩壊を繰返しながら払い出しが進行しているものと推察される。
- (3) 土圧計を設置しているBホッパーを停止し, 反対側のAホッパーを運転している時には, Bホッパーの圧力は停止時よりも漸増する。これは偏積による応力負担の移動に起因するものと考えられる。
- (4) しかしながら, 圧力の最大値は運転しているホッパー側で発生し, しかも払い出しホッパーを切りかえた直後の1往復目か2往復目のフィーダーの通過時付近で最大値を記録した後は圧力が漸減する。
- (5) 1日の運転終了時の圧力は夜間停止中も保持される。

(6) 払い出し全期間中における圧力最大値は必ずしも満杯時からの払い出し開始直後に発生するのではなく, 今回の場合では6,000 t~4,000 tの貯炭時のいずれかに瞬間的に発生し最大圧力の持続性はない。

図-6に壁面Aラインとホッパーでの6,000 t~4,000 t

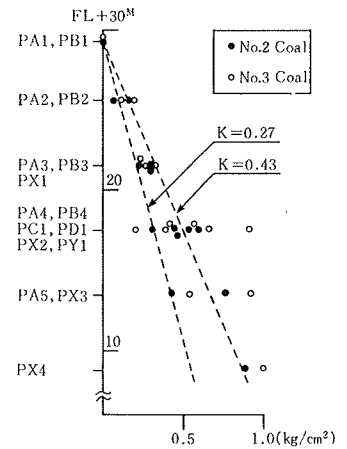


図-4 壁面静置圧力

時における圧力の変動幅を静置時圧力と共に示した。

同図から、今回の測定に関して以下の傾向が見られる。

(1) 流動時には圧力が大きく変動するが、全体的な圧力分布の形状は静置時圧力に類似している。払い出し口付近では圧力変動幅は小さく、圧力値は静置時圧力を下まわる。

(2) 流動時最大圧力

の静置時圧力に対する比率(過圧係数)は、壁、ホッパー共に約2.0~3.0程度である。

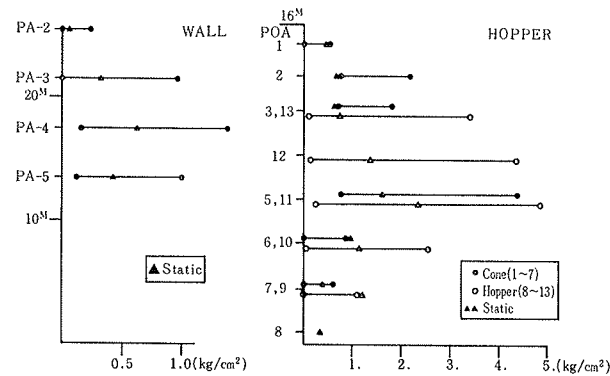


図-6 流動時圧力の変動幅

3.5. 流動時圧力の考察

サイロ構造体の圧力設計では、静置時圧力と流動圧力とを正しく評価することが大切である。特に流動時圧力は一般に払い出し口付近を除いては静置時圧力を上まわるので、設計を支配する要因の一つとして十分な配慮が必要であるが、その算定方法は未だ確立しているとは言いがたい。現行の国内外の諸規準では過去に実施された小型模型実験結果等を参考にして、ヤンセン式などで算定された静置時圧力に過圧係数(1.0~2.0以上)を乗じて割増すことになっている。また、理論的なホッパーでの流動時圧力の算定式としては、ウォーカー式、ウォルター式、綱川式などが一般によく知られているが、これらはいずれもホッパー内での石炭の応力つりあい式を導いて、壁面に働くせん断力と垂直応力との関係をモール円で描き、壁面での破壊包絡線との交点から解を求める点で共通している。これらの理論解の検証は主に円錐形ホッパーの模型実験に対して行ない、比較的良い結果が報

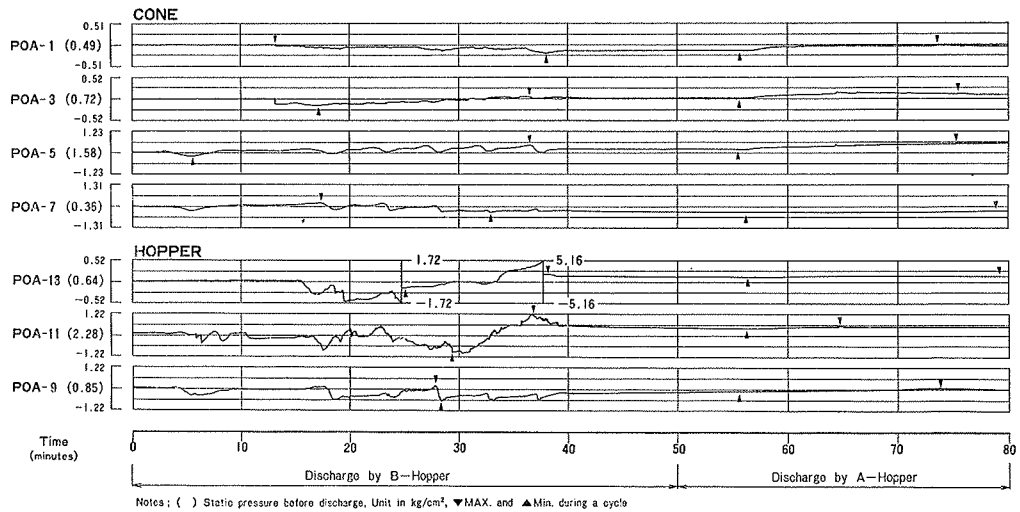


図-5 払い出し時の流動圧力記録例(ホッパー)

告されているが、本サイロのような大型直線スリット型ホッパーでの実測、検証の例は少ない。

そこで、ここではまず測定結果を圧力設計に適用する立場から検討を加え、次に上記理論式の内、ウォーカー式による算定値との比較を試みる。

図-6では流動時圧力の変動幅分布を示したが、ここではその内特に大きな圧力を示した POA-11 を例として、更に詳細に考察してみる。図-7(1)は払い出し開始直後から全期間中での最大圧力発生時を含む約1,000t 払い出し迄の圧力変化を時間的経過と共に運転サイクルと対応させて示したものである。図中の棒グラフはAホッパー又はBホッパー運転時でのそのサイクル中に発生した最大値及び運転休止時圧力を結んだものである。同図から、便宜的に1時間ごとの圧力を読み取り、この期間中での平均圧力と発生頻度とを計算して確率密度分布で表わすと図-7(2)のようになり、平均圧力に対して標準偏差で σ をを越える圧力(3.1 kg/cm²)の発生する確率は非常に小さいことがわかる。以上の計算の仮定は、サンプリング1時間中ではその圧力が持続するものとしているが、図-5の動的記録に見る通り1時間中にも圧力は脈動しているため最大圧力の発生頻度は更に少ないこ

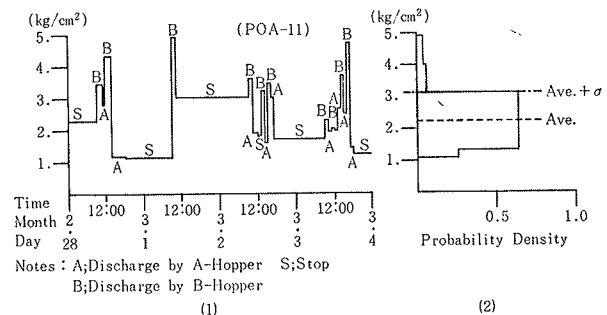


図-7 最大圧力の経時変化と確率密度

とは言うまでもない。又、サンプリング期間を更に長期に取れば、平均圧力、確率密度分布共に圧力の小さい方へ評価される。

同様の作業をホッパーで大きな圧力を示した各測定点について行なった結果が図-8に示されている。即ち石炭の流動中におけるホッパーでの圧力は、部分的なアーチの形成、崩壊によって瞬間的には非常に大きな圧力を生じることもあるが、設計用として考える場合の常時荷重としては、同図中の薄墨で示した程度の範囲を考慮しておけば妥当ではないかと考える。

次にウォーカーの理論解を上記の測定結果に適用して検討する。計算に用いた数値は物性試験結果を参考にして、石炭の有効内部摩擦角 $\delta=38.5^\circ$ 、対 sus 壁面摩擦角 $\phi_w=19^\circ$ とする。ウォーカー式ではホッパー内の石炭応力が流動中は受働応力状態を仮定して、その計算結果が図-8中に点線で示されている。今、ウォーカーの理論を拡張して、図-9のようにホッパー内である深さより上部では主働応力状態、それより下部では受働応力状態であると考え、その応力のスイッチ位置を深さ方向で変化させると図-8中の実線群となる。この実線群の包絡線は、先の測定結果で得られた確率密度分布とほぼ対応することがわかる。即ち、大型直線スリットを有するホッパーにおいても、流動時の圧力は瞬間的に発生する大きな圧力を除けば応力のスイッチ現象を加味したウォーカー理論でほぼ推定可能と思われる。尚、参考までに計算によるスイッチ応力の包絡線は、土圧理論による静置時圧力の約2.0~2.5倍であり、実測による過圧係数とほぼ対応する。

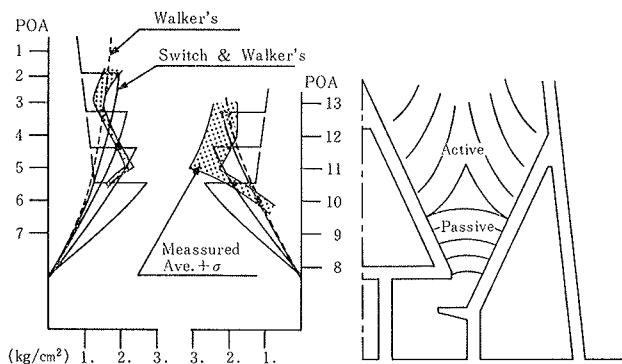


図-8 測定値と計算値

図-9 応力状態

4. 流動性状

石炭払い出し中の流動性状を、(1)ジェニキセルによる一面せん断試験結果と、(2)サイロ内の炭錐変化の観察とから検討する。図-10は第1炭~第3炭でのせん断試験結果より最大圧密応力 (σ_1) と一軸圧縮応力 ($\bar{\sigma}_1$) との関係を示したものであ

る。図中のffはジェニキ理論により、ホッパー形状と石炭物性から定められるアーチ内最大応力を示すフローファクターで、本サイロの場合には、 $ff=1.4$ である。FFカーブがffカーブより下方であれば石炭は流れ易いことを示している。

一方、払い出し中のサイロ内石炭の炭錐変化を、屋上に設置したモニターTV、及びレベル検尺で観察した。図-11はその結果の一例で、払い出しに伴い全体として一様に石炭が沈降していく、いわゆる

良好なマスフロー流動が観察され、全量払い後のサイロ内点検でも、残炭、付着炭は認められなかった。

5. まとめ

本報告では大型直線スリットホッパーを有する6,000t貯炭サイロの圧力測定結果の内、特に払い出しに伴う流動時変動圧力について実用的立場から考察し、既述の理論解を拡張して検討した。本サイロでの石炭焚実証試験は今後銘柄の異なる種々の石炭に対して継続される予定であり、圧力測定、流動性の調査についても更に異なる条件下での実施が予定されているので、将来的な設計に関する結論はここでは保留する。

謝辞 本研究は関西電力(株)姫路第一発電所内の貯炭サイロを使用して、石川島播磨重工業(株)との共同研究で実施したものである。同設備の提供と有益な御助言及び発表の機会を御承認いただいた関西電力石炭焚実証試験関係者各位、及び諸試験の計画、実施、解析に当りIHI 土木建築設計部各位に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) A. W. Jenike: Storage and Flow of Solids, Bul. 123 of the UTAH Eng. Experiment Station, (Apr. 1980)
- 2) D. M. Walker; An Approximate Theory for Pressure and Arching in Hoppers, Eng. Science, Vol. 21, (1966)

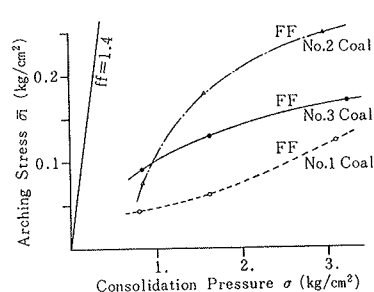


図-10 石炭の流れ易さ

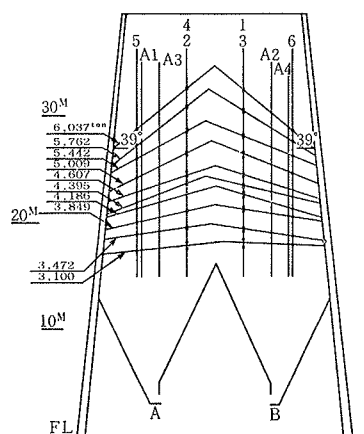


図-11 払い出し時炭錐変化