プリズム形インサートによる既設コールバンカーの 閉塞防止

綱 川 浩*

The Use of a Prism-Shaped Insert to Prevent Bridges in Existing Coal Bunkers

by

Hiroshi TSUNAKAWA[†]

A method is described for the design of a prism-shaped insert which is equipped in a rectangular converging hopper over its outlet in order to prevent the formation of a static stable arch in a cohesive powder. The critical span of the static arch is estimated from Jenike's procedure that is modified on the basis of static stresses developed during the initial fill of the hopper, using with results of a fixed volume direct shear test.

Safety factors are considered in regard to the size of the hopper outlet and the span of the wedge-type channel constructed around the prism-shaped insert. When the values of the safety factors are given, the optimum dimensions of the prism-shaped insert are determined.

A prism-shaped insert of 700mm in width and 2180mm in length is designed in order to initiate the discharge of wet coals from existing rectangular bunkers with a capacity of 640m³ and a hopper outlet of 615mm in diameter. It did so with complete success.

Key Words : Insert, Bridge, Bunker, Coal, Flow property

1. 緒 言

火力発電所などをはじめとして石炭を使用する事業所では、最近の経済事情を反映して高価な国内炭から低廉な海外炭への転換が進められている。そのため、既設のコールバンカーにおいては、石炭の力学的性質の変化が原因となる閉塞トラブルが発生したり、また多分にトラブルが予想される事態が生じている。その対策として、既設バンカーの改修を余儀なくされる場合がある一方で、簡便なインサートを効果的に活用す

る方策もある。また、既設バンカーあるいはホッパーの中には、設計不良によると考えられる閉塞トラブルも多く発生しているようであるが、その解消のためにもインサートの活用が考えられてしかるべきである。

そこで、石炭火力発電所の既設コールバンカーにおいて、閉塞トラブル解消のために導入したプリズム形インサートの実施例を示し、インサートの活用法を述べる。

2. 既設コールバンカーの概説

北海道電力(株)苫東厚真火力発電所における第1号コールバンカーの概略をFig.1に示す。同形のコールバンカー5基が現在稼働中である。バンカーは鋼板製で、容量は約640m³である。国内炭使用による従来の運転経緯から、鋼板製バンカーでは、石炭のマスフローが得られず、またバンカー壁への付着炭が観測さ

昭和63年7月13日受付

粉体工学会春期研究発表会にて発表(1988年5月, 大阪)

* 横浜国立大学工学部物質工学科

(〒240 横浜市保土ヶ谷区常盤台156)

TEL 045-355-1451 内線2869

† Dept. of Chem. Eng., Yokohama National University,
156 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama 240

Fig.1 Dimensions of the first bunker with a capacity of 640 m³ in a coal-fired thermal power station

れていた。そのため、1984年10月の定期補修を機に流動状態改善策として、5基のうちの1基だけに試験的に鋼板壁を超高分子量ポリエチレンライナー（ハイモラー®）でライニングした結果、良好なマスフロー状態が実現された。しかし、補修終了後の始動時には、5基のパンカーすべてに石炭のブリッジによる閉塞トラブルが発生した。ブリッジの強制的破壊によって、石炭の流れは一応確保できているものの、連続運転で稼動中にもしばしばブリッジが発生し、石炭の流れが停止する状況であった。

1987年夏期、国内炭から海外炭への転換にあたり、実験用ホッパを用いた海外炭の排出状況観測結果から、国内炭にくらべて海外炭の流動性の低下が予測された。そこで、すべてのバンカーについて、鋼板壁のポリエチレンライナーによるライニングを実施し、かつブリッジ解消策としてプリズム形インサートの導入が計画された。

また、同発電所における第2号コールバンカーの概略をFig.2に示す。同形のバンカー5基が稼働中である。バンカー壁面にはすべてポリエチレンライナーが使用されており、海外炭の払出にもマスフロー状態で、全く支障なく運転されている。

3. プリズム形インサートの設計法

矩形ホッパにプリズム形インサートを設置した構成を **Fig. 3** に示す。矩形ホッパの互いに対向する壁面の傾斜角は同じとする。インサートの設置方向はホッパの短辺壁に並行とし、インサート斜面の傾斜角は短辺

Fig. 2 Dimensions of the second bunker in a coal-fired thermal power station

Fig.3 Schematic diagram of a rectangular converging hopper equipped with a prism shaped insert

壁の傾斜角と同じにする。また、インサート斜面の板材はホッパ壁材に同じとする。

インサートの設計の要点は、インサートの幅 D_i および設置位置 Z_p を適切に選定することであり、これによってインサート設置部の流路およびホッパ排出口における粉体の流れを確保することである。そのためには、粉体のブリッジの限界寸法を知る必要があり、これはホッパ内の粉体の静的応力に基づくホッパの流れ係数と粉体の流れ関数との比較から算定できる¹⁾。

Fig. 3 に示したホッパは3つの領域に分けて考えられ、各領域における粉体の静的応力はEqs.(1)から(4)により推算できる²⁾。

$$\sigma_{vn} = A_n(1-z) - (A_n - E_n\sigma_{sn})(1-z)^{K_n} \quad (1)$$

$$A_n = g\tau_n d_n / 2(K_n - 1) \tan \alpha_n \quad (2)$$

$$K_n = \frac{(1+m_n) \sin \phi_n \cos(2\alpha_n + \phi_n)}{\{1 + \sin \phi_n \sin(2\alpha_n + \phi_n)\} \tan \alpha_n} \quad (3)$$

$$\sigma_{1n} = \frac{1 + \sin \phi_n}{1 + \sin \phi_n \sin(2\alpha_n + \phi_n)} \sigma_{vn} \quad (4)$$

ここで、 n は領域番号、 z は各領域の最高部からの無次元深さ、 g は重力加速度、 d_n はホッパの代表寸法、 E_n は付加応力係数、 m_n はホッパ形状係数(クサビ形ホッパでは0、円形および正方形ホッパでは1)、 α_n はホッパの平均半頂角、 τ_n は充填密度、 ϕ_n は粉体と壁面との摩擦角、 σ_{vn} は垂直応力、 σ_{sn} は付加応力、 σ_{1n} は最大主応力である。

また、ホッパ内に形成されるブリッジの最大応力 σ_{1n}' はJenikeの解析結果³⁾に従うつぎの式で表される。

$$\sigma_{1n}' = g\tau_n d_n (1-z) / H_n \quad (5)$$

ここで、 H_n はホッパの形状と半頂角で与えられる係数である。

そして、ホッパの流れ係数曲線は σ_{1n} と σ_{1n}' の関係として表される。Eqs.(1)から(5)の計算にあたって、ホッパの形状係数 m_n と付加応力係数 E_n について考察する。領域1は矩形ホッパであるが、断面積の等しい正方形ホッパで近似すると、 m_1 は1である。また、領域1にはその直上の粉体応力がそのまま伝達されてくるから、 E_1 は1である。領域2はインサートの両側に構成される矩形ホッパであるが、インサートの低部付近での流路はスリット形となることから、設計上はクサビ形ホッパとみなす方が安全である。したがって、 m_2 は0であり、また E_2 は1である。領域3はインサートの下側の矩形ホッパであるから、領域1と同じ取り扱いとなり、 m_3 は1である。しかし、付加応力係数 E_3 は、インサートが支持する粉体重量の大きさに依存し、インサートの幅と領域2の流路幅の関数で表される^{2,4)}。

ホッパの流れ係数は領域2および3について必要となる。領域2において、インサート設置部の流路の閉塞限界寸法 B_c が算出でき、また領域3において、ホッパ排出口の閉塞限界寸法 D_c が算出できる。

ここで、インサート設置部の流路幅 B_o およびホッパ排出口寸法 D_o に関する安全係数をそれぞれ f_B および f_D とし、つぎのように表す。

$$f_B = B_o / B_c - 1 \quad (6)$$

$$f_D = D_o / D_c - 1 \quad (7)$$

既設のバンカーおよびホッパの場合、排出口寸法 D_o はすでに定められており、閉塞に対しても拡大変更が許されない。プリズム形インサートの設置によって、

現状排出口寸法のままで所望の安全係数 f_B および f_D を達成できるような設計をしなければならない。

4. 計算結果およびインサートの実施例

同火力発電所において、部分的に使用中の海外炭(粒径50mm以下)を目開き5.66mmのフルイで分け、通過分をサンプル(水分14.3%)として定容積型直接せん断試験装置を用いて力学的性質を測定した。その結果、充填密度は850から950 kg/m³である。有効内部摩擦角は33°であり、ポリエチレンライナーに対する壁面摩擦角は17.2°である。また、流動度 f/rg と最大圧密応力 σ_1 の関係はFig.4に示してあり、次の式で近似できる。

$$f/rg = 0.0365 \sigma_1^{0.556} \quad (8)$$

この関係は粉体の流れ関数FFに相当する⁵⁾。

Fig.1に示した第1号コールバンカーの場合、ホッパの長辺壁は左右対称であり、その傾斜角は67.2°である。しかし、短辺壁の傾斜角はメインホッパおよびサブホッパともにわずかながら左右で異なり非対称であるが、設計計算では平均化して傾斜角60.6°とする。

現状のままの第1号バンカーに海外炭を満載にした状態を想定し、ホッパの流れ係数を計算すると、Fig.4の実線ff₁のようになる。石炭の流れ関数FFとの交点から、ホッパの閉塞限界排出口径 D_c を算出すると、796 mmになる。ホッパの実際の排出口径 D_o はFig.1に示したように615 mmであるから、Eq.(7)より安全係数 f_D は-0.22となる。したがって、満載後のバンカーからの初期の払出しにおいては、国内炭の払出し状況から判断しても、ブリッジによる閉塞の危険性がきわめて高い。

これに対して、第2号コールバンカーの場合、形状が複雑であるため、最悪条件を想定して、Fig.2の正

Fig.4 Flow function of the coal and flow factors of two existing coal bunkers

面図左側に点線で示すようにホップ高さ 6780 mm の部分の傾斜角を 65.5° として、ホップの流れ係数を計算した。結果は **Fig. 4** に破線 ff_2 で示すとおりであり、これよりホップの限界排出口径は 565 mm となる。したがって、第 2 号バンカーの排出口の安全係数 f_D は 0.33 となるが、実際にはこの値よりかなり安全設計になっていると考えられる。

このように、限界排出口寸法の計算結果は同発電所における第 1 号および第 2 号コールバンカーの稼働状況と全く良く対応していることがわかる。したがって、計算方法の妥当性が立証されたものと判断できる。

そこで、プリズム形インサートを第 1 号バンカーのサブホップ部分に設置する計画が提案された。まず、インサート設置の有効性を探索するため、安全係数 f_B をパラメータとし、インサートの設置位置 Z_p を変化させることにより、プリズム形インサートの幅 D_i とホップ排出口径の安全係数 f_D を算出した。計算結果を **Fig. 5** に示す。インサートの設置許容領域は、 f_B が 0、 f_D が 0 および Z_p が 0 をそれぞれ満足する 3 本の境界線で囲まれた部分である。さらに、安全係数 f_B が 0.2, 0.4, 0.6 および 1 となる包絡線を設置許容領域内に示した。

なお、各包絡線は、一部破線で示したように、 D_i が 0 (インサート無し) のとき、 f_D は -0.22 (現状第 1 号コールバンカーの安全係数値) に集結する。

このように、安全係数 f_B および f_D の値を指定することにより、**Fig. 5** からインサート幅 D_i の決定が可能となる。したがって、安全係数の値をいかに選定するかが設計の要点になる。**Fig. 5** に示したような計算結果は石炭の流動性に大いに依存する。一般に、石炭の流

Fig. 5 Computed results of possible region of equipping with a prism shaped insert in the first bunker

動性は付着水分に影響され、さらに水分は季節的にも変動する。しかし、石炭の流動性の水分による変化はおよそ 30% 以内に設定できる⁶⁾。一方、インサート設置のモデルバンカー (おもな仕様は容量約 4 m³, 円筒の高さ 1.6 m, 内径 1.6 m, ホップ傾斜角 60° , インサート幅 350 mm である) を用いた石炭の排出実験結果によると、安全係数 f_B が、0.23, f_D が 0 の条件でマスフロー状態が確認されている²⁾。

これらの事情を考慮すると、安全係数 f_B は 0.60, また f_D は 0.30 に設定できる。**Fig. 5** に示した計算結果から、これらの安全係数値を満足するインサート幅 D_i は約 0.7 m となる。そこで、プリズム形インサートの幅 D_i を 0.7 m に固定し、インサートの設置位置 Z_p を変化させたとき、安全係数 f_B および f_D の計算結果を **Fig. 6** に示す。これらの計算結果から、インサートの設置位置 Z_p が 0.3 m のとき、安全係数 f_B および f_D の値がそれぞれの設定値 0.60 および 0.30 をほぼ満足することがわかる。

Fig. 6 Variation of safety factors with the position of a prism shaped insert of 700 mm in width

Fig. 7 Flow function of the coal and flow factors of the first bunker equipped with a prism shaped insert of 700 mm in width

Fig. 8 Dimensions of the sub-hopper of the first bunker equipped with a prism shaped insert as designed

そこで、インサートの幅 D_i を0.7 m、設置位置 Z_b を0.3 mとする設計条件により、あらためてホップの流れ係数を領域2と3について計算した。計算結果と石炭の流れ関数(およびEq.(8)の計算結果)を**Fig. 7**に合わせ示す。これらの計算結果から、インサート設置部流路(領域2)の閉塞限界幅 B_c は0.411 m、またホップ排出口(領域3)の閉塞限界口径 D_c は0.479 mとなる。

以上のようにして設計されたプリズム形インサートを**Fig. 1**に示した第1号コールバンカーのサブホップ部分に実際に設置した構成を**Fig. 8**に示す。サブホップの短辺壁の傾斜はわずかに左右非対称であるが、インサート設置部の流路幅が左右側とも同じになるようにインサートを設置したため、 B_c は0.640 mである。したがって、インサートはホップの中心軸に対して約30 mmほど左に寄っている。インサート設置部の流路幅に関する安全係数 f_b は0.56となる。また、ホップ排

出口の安全係数 f_o は0.28となる。安全係数のこれらの値は当初の設定値をほぼ満足している。

インサートの取り付け工事は1987年5月から7月にかけての定期補修期間中に5基の第1号コールバンカーすべてに対して実施された。インサートの斜面およびバンカー壁面にはすべてポリエチレンライナーが使用された。そして、同期間中に行われた試験運転ならびにその後現在に到るまでの営業運転の過程で、海外炭の連続払出し操作時ならびに払出し一時停止後の再起動時(断続的払出し操作)においてもブリッジの発生は皆無であり、海外炭の払出しが十分に確保されている。したがって、プリズム形インサートによる閉塞防止の有効性が立証されるとともに、インサートの設計法が妥当であると判断できる。

5. 結 言

既設バンカーの閉塞トラブル解消策として、プリズム形インサートの設置を提案し、その設計法を述べた。インサート設置部のスリット形流路幅の安全係数値および排出口寸法の安全係数値を指定すると、インサートの最適寸法および設置位置が決定できる。

石炭火力発電所で稼働中のコールバンカー5基にこの設計法を適用した結果、炭種転換にとまってあらかじめ予測された閉塞トラブルを回避でき、石炭の円滑な払出しを確保できた。

また、ブリッジの限界寸法は粉体の静的(投入)状態で大きく、動的(排出)状態で明らかに小さい。本計算法は粉体の静的状態の応力に基づくブリッジの限界寸法を評価できるため、ホップを設計する場合、従来の動的状態の応力に基づく計算法に比べて、粉体のより安全な払出しを確保できる。

さらに、既設バンカーの中には、ブリッジを回避するため、壁面を著しく急傾斜にしている例があるが、インサートの活用により、ブリッジの解消と同時に壁面傾斜角の大幅な低減が可能となるため、傾斜壁部の高さを半減できる。

Nomenclature

B_c : critical span of the second section of hopper [m]	stress [-]
B_o : span of the second section of hopper [m]	f : unconfined yield strength [kPa]
D_c : critical size of hopper opening [m]	f_B : safety factor for span of the second section [-]
D_i : width of the prism shaped insert [m]	f_D : safety factor for size of hopper opening [-]
D_o : size of hopper opening [m]	g : acceleration due to gravity [m/s ²]
d_n : ratio of cross-sectional area to perimeter [m]	H_n : coefficient [-]
E_n : coefficient concerned with the surcharge	K_n : coefficient defined by Eq.(4) [-]

m_n : shape factor of hopper	[-]	σ_{1n}' : critical stress of bridge	[kPa]
Z_p : position of the prism shaped insert	[m]	σ_{sn} : surcharge stress	[kPa]
z : dimensionless depth below top of hopper	[-]	σ_{vn} : vertical stress	[kPa]
α_n : half angle of hopper apex	[deg]	<subscript>	
γ_n : bulk density of powder	[kg/m ³]	n : n-th section of hopper installed with the	
ϕ_n : frictional angle between powder and wall	[deg]	prism shaped insert (n=1 to 3)	
σ_{1n} : major consolidation stress	[kPa]		

References

- 1) Tsunakawa, H., R. Aoki, K. Kojima and K. Matsushima : *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **15**, 336 (1978) and **15**, 594 (1978)
- 2) Tsunakawa, H., D. Kunii, T. Kubota and T. Nagata : *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **24**, 296 (1987)
- 3) Jenike, A. W. : *Bulletin* 108, *Eng. Expt. Sta.*, Utah State University (1961)
- 4) Tsunakawa, H. : *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **18**, 223 (1981) or *Int. Chem. Eng.*, **22**, 280 (1982)
- 5) Tsunakawa, H., D. Kunii, F. Takagi, M. Sugita, T. Tamura and H. Haze : *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **23**, 678 (1986)
- 6) Tsunakawa, H. : *Thermal and Nuclear Power, Japan*, **34**, 939 (1983)

新しい言葉

古い言葉

エネルギー解放率

材料の脆さの程度である破壊靱性を「力、応力」の側から表現したのが「臨界応力拡大係数 (K_{IC})」* であるなら、破壊靱性をエネルギーの側から表すのが「エネルギー解放率 (G)」であり、両者はある相関関係を持っている。 G は「クラックが伸び、単位面積だけ新しい面ができるのに必要なエネルギー」と定義されている。原子レベルからみれば、クラックが伸びるということは原子間結合を断ち切って新しい表面が作られることになる。このクラック進展のため解放された原子間結合エネルギーは次のクラック成長に使われたり表面エネルギーの形で残るが、それに等しいエネルギー、仕事が材料に加えられないとクラックが成長して破壊にいたらない。エネルギー解放率はクラック成長に必要なエネルギーと

考えていただければ良いと思われる。

エネルギー解放率は巨視的には図1のクラックがある材料の荷重—変位関係から求められる。長さ a のクラックを持った材料に比べ、クラック長さが微小長さ δa だけ増加した場合の荷重—変位関係は傾きが僅かにゆるやかになる。このクラックが伸びたことによるウスズミ部分の面積がエネルギー解放率 (G) と新しくできた表面の面積との積に等しくなる。クラックが伸びるに従い G も増加し、「応力拡大係数」と同様にこの G がある臨界値に達すると破壊が発生することになる。

図1 クラックのある材料の荷重—変位関係

(名古屋工業大学 神谷秀博)

* Vol. 26, No. 2, p. 84 参照