

サイロ内壁に作用する圧力測定

金谷 祐二
宮崎 祐助

概要

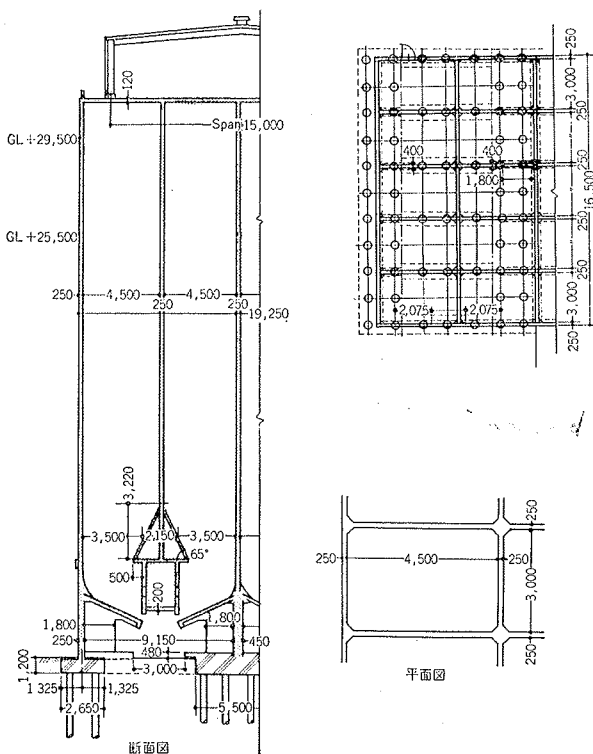
本報告書は、(株)昭和産業神戸工場において実施したミールサイロの内壁およびその傾斜部に貼られた鋼板に作用する粉体圧力の測定結果である。

この鋼製斜板は内容物を抽出するときに内容物の円滑な流動を促進する役目をするものであるが、この部分には抽出時に衝撃性の大きな荷重の作用することが経験的に判明している。今回の測定はこの衝撃力をつかむことに重点をおくとともに内容物(脱脂豆カス)の投入時、攪拌時、定常時および抽出時等について静的・動的圧力の諸性状を調査し、今後の設計・施工、さらにサイロ管理上の一資料とすることを目的とするものである。

1. 測定サイロの概要

圧力測定を行なったサイロは、図一に示すように、内法寸法4.50×3.00mの矩形平面をもつ高さ33.53mの角形コンクリートサイロで、抽出口の上方9.35mのところ3.25×3.52mの鋼製突出物を取り付けられているのが特徴である。

この突出物は、垂直壁に対して60°のこう配をもつ



図一 測定サイロの概要

鋼板で(以後、単に鉄板部と呼ぶ)、抽出時の流動性をよくするとともに、残留をなくし、さらに抽出口上部に生じやすい架橋現象を防ぎ、内容物の一様な抽出を促進する働きをもっている。

抽出方法は、レーキによるかき出し方式で、サイロ内壁はモルタル金ゴテ仕上げである。

サイロ設計時に採用された側壁の圧力分布を図二に示した。

設計は Jansen の式に基づいてなされており、動的圧力を考慮して圧力分布を決定している。

$$P = \frac{\gamma \cdot A}{U \tan \phi'} (1 - e^{-2Z/\gamma}) \quad (1)$$

$$P_{\max} = \frac{\gamma \cdot A}{U \tan \phi'} \quad (2)$$

ここに

P: 側壁に作用する圧力 ton/m²

P_{max}: 側壁に作用する最大圧力 ton/m²

γ: 内容物の比重 ton/m³

A: サイロの断面積 m²

U: サイロの周長 m

tan φ': 内容物と側壁との摩擦角

Z: サイロ先端からの深さ m

$$Z = \frac{A}{UK \tan \phi'} \quad \text{ただし、} K = 0.3 \cot \phi' \quad (\text{by } \cdot \text{Frohlich})$$

なお、設計に使用した基本的な数値は次の通りである。

$$\gamma = 0.53 \text{ ton/m}^3 \quad \phi = 18^\circ 30'$$

$$A = 13.5 \text{ m}^2 \quad U = 15.0 \text{ m}$$

$$\tan \phi' = 0.33 \quad K = 0.9$$

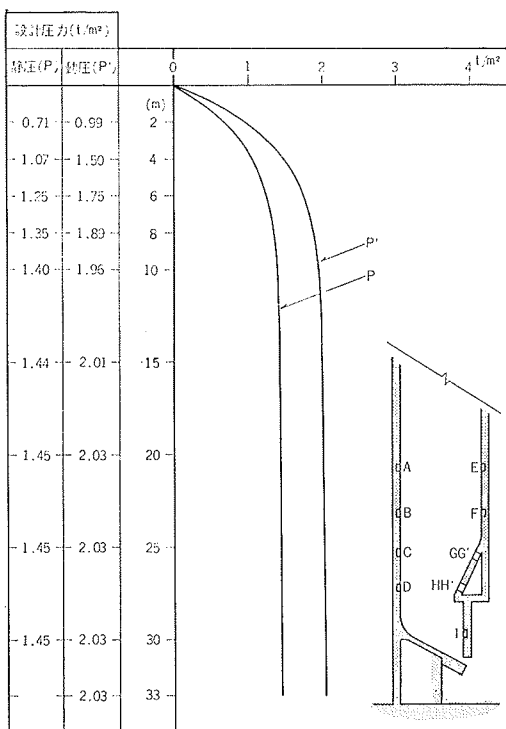


図-2

また、動的圧力に対しては、動圧係数 1.4 を静圧に乗じて求めている。

2. 測定概要

測定は内容物を 150ton および 195ton 投入したときの投入・攪拌・定常・抽出時についておこない、さらに別に内容物を 150ton 投入したのち、これを72時間放置したときの抽出時について実施した。測定項目は次の通りである。

- i 測定 I (内容物150ton)**
 - a 内容物投入開始 2 時間後から投入完了時まで投入時圧力の測定
 - b 投入完了から16時間放置後に定常圧測定
 - c 同上の抽出時圧力測定
- ii 測定 II (内容物195ton)**
 - a 内容物150ton での攪拌時圧力測定
 - b 内容物 150ton~195 ton の追加投入時の圧力測定
 - c 195tonでの攪拌時の

圧力測定

- d 定常圧の測定
- e 抽出時の圧力測定
- iii 測定III (内容物 150ton, 投入後72時間放置)**
 - a 放置期間中の定常圧の経時変化の測定
 - b 抽出時の圧力測定

3. 計器の取り付け方法

この種の測定において、計器の取り付けで最も注意しなければならない点は、計器の受圧面と壁面とを同一平面上におくということである。受圧面と壁面とに凹凸があるような場合には、この面にアーチアクションによる応力集中などの不均衡な力が生じ、正確な値が得られない。

この点を考慮して、本実験では図-3に示したようにコンクリート壁の部分では、これを削り取って計器を埋設し、鉄板部分では別に受圧面を一致させて計器を取り付けた鉄板と置きかえた。

また、今回の測定はその内容から考えてすべて連続自記記録とすることが望ましいのであるが、測定器の準備期間に無理があったので、最も大きな衝撃荷重が作用すると考えられる鉄板部の4点のみを連続自記記録とし、他は手動測定とした。

使用計器は坂田電機 K. K. の摺動抵抗型 (SPR-156) と差動トランス型 (PD-100) の 2 種類で、図-3に示したような位置に壁面に 7 個、鉄板部に 4 個、計 11 個

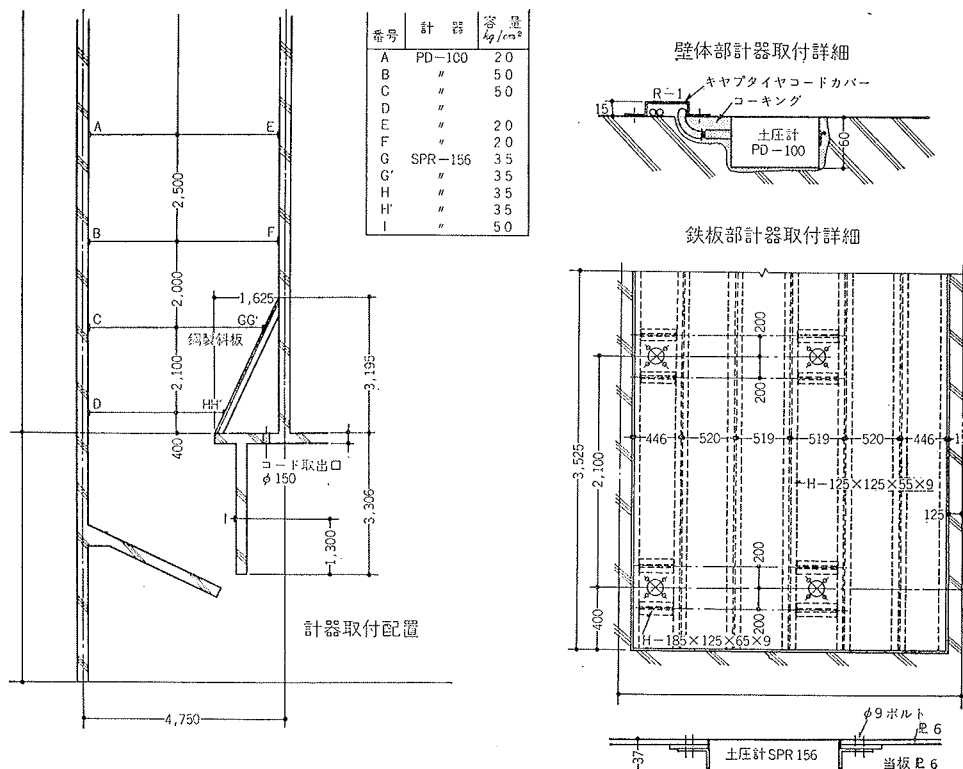


図-3 計器取付位置および取付詳細図

設置した。

計器の諸元および使用した測定器は次の通りである。

計器の諸元

	SPR-156	PD-100
直 径(mm)	156	98
厚 さ(mm)	37	60
受圧面のひずみ	5×10^{-4}	0.2
精 度(%)	± 2	± 0.5

使用測定器

- RB-142 自記録器(摺動抵抗型計器用)
- MD-1D型測定器(差動トランス型計器用)
- CH-24型手動切換器

4. 測定結果とその考察

4.1. 投入時の圧力

投入は2台のコンベヤーを使用し、1台は内容物の固結を防ぐための循環用とし、他の1台で投入(毎時13~15ton)するといった方法によっている。

4.1.1. 測定 I (内容物 150ton)における圧力変動

この状態で壁体に作用する圧力は、図-4の圧力経時変化および表-1にも示したように、鉄板の突出物に取り付けられている側にかなり大きな圧力が作用し(E点: $4.84t/m^2$, F点: $3.15t/m^2$)、反対側の壁にはほとんど圧力はかかっている。

この傾向は測定 II の 195ton 追加投入の際にもみられたものであるが、これは投入された内容物がある個所に集中的に堆積し、この部分の密度が大きくなり、圧力が増大するものと考えられる。内容物の固結もこうしたことがその一因となっているのであろう。

鉄板部の圧力は、終始 $2t/m^2$ を境として上下しているが、投入完了直前に急激な圧力の増大がみられた。

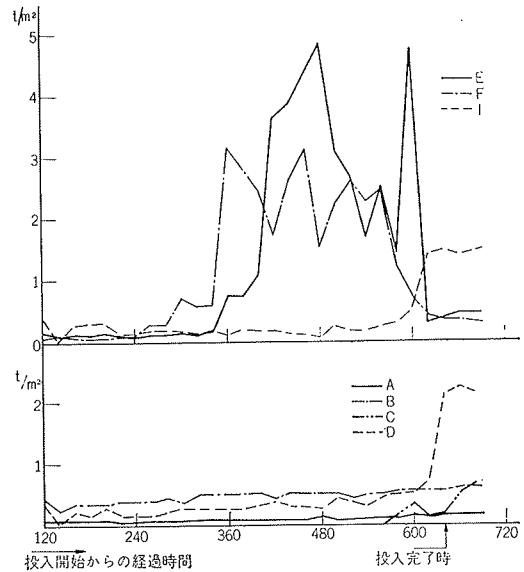


図-4 測定 I における壁体部投入時圧力の経時変化

4.1.2. 測定 II (150ton~195ton 追加投入)における圧力変動

このときの壁体にかかる圧力の傾向は測定 I の結果と一致し、E, F 点の圧力が大きく反対側の圧力は小さい。また、各測点の最大圧力は測定 I の場合と大差なく、内容物が増加したにもかかわらず顕著な変化は見られなかった(表-1 参照)。

すなわち、投入時の圧力分布はその都度その性状を異にするもので、投入量よりむしろサイロ内部での内容物の複雑な動き(流動状態)によって、より支配的な影響を受けるのではないかと考える。

鉄板部は G 点で最大圧力 $4.33t/m^2$ を記録したほかは一般的に小さかった ($1.5t/m^2$ 以下、表-1 参照)。

しかし、いずれにしても投入時には鉄板部およびその付近の壁体に短時間にせよ設計圧力を上廻る圧力が作用することは注意しなければならない。

4.2. 攪拌時(リサイクル)の圧力変動

この時期における各測点の圧力変動はあまり顕著な変化がみられず、測定 I, 測定 II ともに投入完了時にみられた圧力変動にその傾向、圧力量がよく一致していた。

これをいえば、リサイクルがサイロ内に投入された内容物の堆積状態にあまり影響を与えていないといえる。すなわち、リサイクルの際の流動パターン

測定番号	測定 I			測定 II					測定 III			
	150ton			195ton (150~195 t 追加投入)					150ton (投入後72時間放置)			
投入量	150ton			195ton (150~195 t 追加投入)					150ton (投入後72時間放置)			
測定項目	投入	定常	抽出	攪拌(150ton)	追入投入(150~195t)	攪拌	定常	抽出	定常	抽出		
計器取付位置	10時間 40分	12時間	4時間	2 間	3時間	1時間	30分	5時間 30分	72時間	6時間		
壁 体 部	A	t/m^2 0.15	t/m^2 0.67	t/m^2 0.15	t/m^2 0.11	t/m^2 0.13	t/m^2 0.13	t/m^2 0.11	t/m^2 0.11	t/m^2 0.18	t/m^2 3.38	
	B	0.62	0.83	0.84	0.69	0.72	0.73	0.67	0.73	0.45	0.45	
	C	0.34	1.18	1.06	0.50	0.62	0.56	0.56	0.95	0.22	0.56	
	D	2.13	2.72	1.57	7.10	8.51	9.20	7.67	8.62	2.41	1.74	
	E	4.84	0.62	1.65	6.20	7.55	7.46	2.64	3.10	1.67	5.81	
	F	3.15	0.67	1.19	1.89	1.76	1.75	1.00	1.58	2.58	3.54	
	I	1.49	1.75	1.70	0.66	0.91	0.90	0.96	1.20	1.44	5.82	
	鉄 板 部	G	4.72	2.75	7.89	3.17	4.33	3.94	2.36	2.75	4.13	13.00
		G	5.33	2.65	2.66	1.25	1.43	1.23	1.64	1.84	3.28	19.68
H		4.32	1.55	1.96	1.54	1.57	1.57	1.57	1.78	2.75	19.65	
H		3.56	1.98	7.50	1.98	0.99	0.79	0.79	5.14	3.96	26.13	

表-1 各測定における壁体部、鉄板部の最大圧力

は一定したもので、しかも Rat-hall 現象に類似した非常に狭い流動パターンで限られた内容物が循環しているのであって、すでに投入された内容物にはあまり影響を与えず、これらの内容物はみかけの粘着力およびサイロ内壁との摩擦などで自立しているような状態にあるのではないかと考える。

こういった推論に立脚すれば、投入時の圧力形態をそのまま攪拌時に継承する現象は理解できる。

4.3. 抽出時の圧力変動

4.3.1. 測定 I における圧力変動 抽出時の壁体にかかる圧力は投入時および攪拌時に比べ全般的に小さく、いずれも 2t/m^2 をこえていない。

しかし、本測定では内容物投入後12時間放置したため内容物の一部が固結し、鉄板部に図-5に示したような 3t/m^2 を軸として最大圧力 7.89t/m^2 の衝撃性の圧力が作用している。

4.3.2. 測定 II における圧力変動 壁体部には測定 I の場合と同様あまり大きな圧力は作用していない。また、鉄板部も内容物が固結しないうち抽出したため、測定 I に見られたような衝撃性の荷重は作用しなかった(図-6参照)。

4.3.3. 測定 III における圧力変動 ここでは内容物を投入後72時間放置したのちに抽出時の圧力を測定した。

72時間の放置期間中に内容物は完全に固結し、そのため固結した内容物の落下にともなう非常に大きな衝撃荷重が鉄板部に作用した(図-7参照)。このときの鉄板部の最大圧力は、G点： 13.0t/m^2 、G'点： 19.68t/m^2 、(以上鉄板上部) H点： 19.65t/m^2 、H'点： 26.13t/m^2 (以上鉄板下部) で、鉄板部全体に大きな圧力が作用している。

このときの内容物の落下はすさまじく、測定していたわれわれにもはっきり判明できたほどの衝撃音をたて、また、抽出終了後のサイロ内部の調査でも抽出装置のレーキ(鋼製)が無残に破損しているのが認められた。

壁体部でも最大圧力 $5.81\sim 3.54\text{t/m}^2$ を記録したが、抽出後2時間をすぎた頃から急激に圧力が減少し、以後は抽出が完了するまで 0.5t/m^2 程度の一定した圧力が作用している。

抽出時の圧力は、以上にも述べたように内容物をサイロに長時間貯蔵しておいた場合に問題となり、特に固結した内容物の落下にともなう衝撃性の大きな圧力が壁体部および突出部に作用することは注意を要する。

なお、鉄板部に作用した各測定における抽出時の最大圧力分布を図-8に示した。

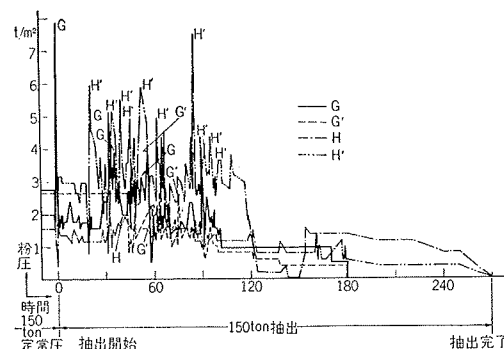


図-5 測定 I における鉄板部抽出時圧力経時変化

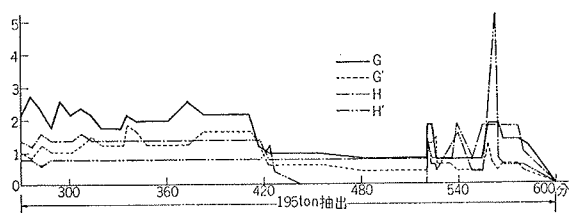


図-6 測定 II における鉄板部抽出時圧力経時変化

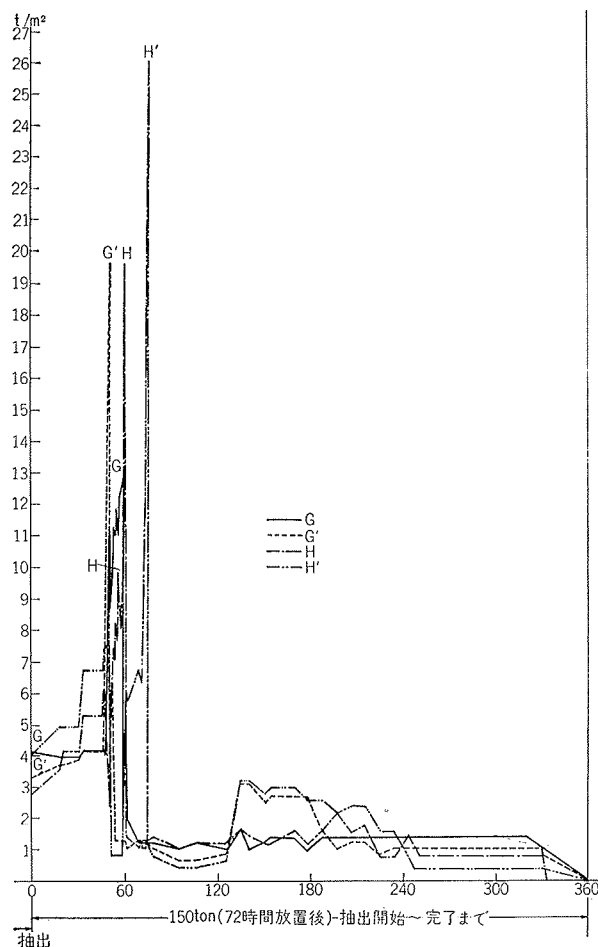
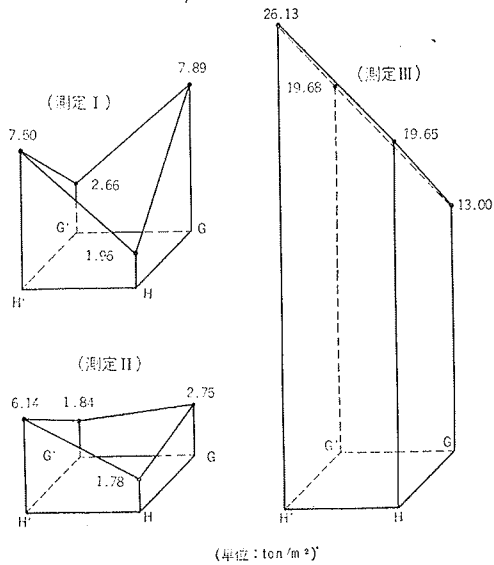


図-7 測定 III における鉄板部抽出時圧力経時変化

4.4. 定常時の圧力変動

今回の一連の測定で、内容物の投入後そのまま放置した期間の静的な圧力をここでは定常圧と称した。

この状態での圧力分布の全体的な傾向は、投入時の



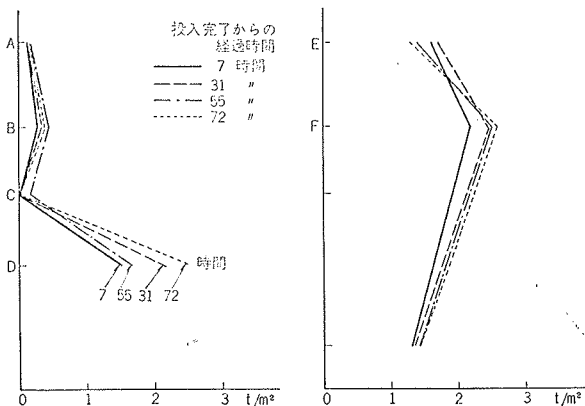
図一八 各測定における鉄板部抽出時の最大圧力分布

ものに一致しており、攪拌時の圧力分布と同様に投入時の圧力分布の形態を継承するようである。

測定Ⅲの72時間放置期間中の壁部の圧力変動の分布を表一2、図一9、に示したが、時間の経過にともな

投入完了からの経過時間	粉 圧 t/m ²						
	A	B	C	D	E	F	I
7時間	0.13	0.28	0	1.51	1.61	2.19	1.32
31 "	0.13	0.34	0	2.13	1.69	2.45	1.35
55 "	0.18	0.45	0.17	1.68	1.39	2.51	1.44
72 " (抽出開始直前)	0.17	0.39	0	2.41	1.30	2.58	1.44

表一2 測定Ⅲにおける壁部定常圧の経時変化



図一九 測定Ⅲにおける壁部定常圧分布

い除々に圧力の増加する傾向が見られた。

これは、内容物の固結にともない見掛比重が増大するためと考えられる。

5. 結語

今回の測定から定性的に判明したことをとりまとめ考察を加える。

1. 定常時および攪拌時におけるサイロ壁体部に作用する圧力は、投入時の圧力分布の形態を継承する傾向にある。

2. 投入時の圧力分布は、内容物の流動形態や堆積状態に支配的な影響を受けるらしく、圧力分布は一定の傾向を示すことなく、ある部分に集中的に作用する傾向がみられた。

3. サイロの壁体部にかかる最大圧力は、定常時の静圧力よりも投入時、攪拌時および抽出時などの動圧力が作用したときに生じる。

4. 上記の事項を考えあわせると、サイロの内圧としては、動的荷重が、しかも不均衡に作用した場合が最も不利で、静圧をもって設計荷重とすることには問題がある。現行の動圧係数を定量的に調査することが今後の研究課題の一つであろう。

5. サイロ内に長期間貯蔵していた内容物を抽出する場合には、サイロの底部や内部の突出した部分に非常に大きな衝撃性の圧力が作用するので、その形態には十分な配慮が必要である。

本測定にあたって ㈱昭和産業神戸工場工務課および抽出課の方々に、また、測定準備などで大林組神戸支店建築課、同神鋼工事々務所のみなさんに多大なご協力を得ました。

ここに厚く感謝の意を表します。

参考文献

1. 日本建築学会編「建築学便覧」
2. 杉田稔他3名「サイロ壁体に加わる粉体圧力分布の測定」清水建設研究所報 第10号
3. Н. Сорокин, РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ ЗЕРНА ПРИ ОЛРОЖНЕНИИ СИЛОСОВ
4. Alexander M. Turitzin "Dymamic Pressure of Granular Material in Deep Bins"
5. 久保輝一郎他3名「粉体—理論と応用—」