

4. 調査研究結果

4.1 調査概要

わが国は、国内で消費する穀類の多くを海外よりの輸入に依存しているが、今後ともこの傾向は続くものと予想される。

このような輸入穀物量の増加にともない、その受入施設の整備拡充が進んでいるが、現在、受入施設としてはサイロがもっとも一般的な構造物であり、国家の助成制度ともあいまって近年多数のサイロが建設されつつある。

しかしながら、わが国にはサイロ建設にともなう設計法、施工法に関する指針、基準などが存在せず、建設にあたっては、諸外国の規準および社内資料等を参考としている。

以上のような経過のもとに土木学会では、主に鋼製サイロの設計・施工に関する内外の資料・文献を収集し、下記項目について調査を行った。なお、各項目の詳細は次節以降に紹介し、ここでは概略のみを述べる。

(1) サイロ建設の歴史的経過

サイロとは古来、食料の長期保存およびサイレージのための構造物であり、形状も塔状のものとは限らなかった。現在では穀物貯蔵用の大型サイロが主であるが、工業用、牧畜用のサイロも多く建設されている。

分類法は、形状、材質、用途によって区分されるが、今回の調査では、主に穀物用円筒形大形集合サイロおよび骨材用コルゲートサイロ等を中心に行った。

(2) サイロ設計法の発展

サイロの設計法が注目されるようになったのは、19世紀末から20世紀初期にかけて、Janssen, Airy, Ketchum等の実験が行われ、内容物の静的なつり合いから導かれたJanssenの理論式が登場するに到ってからである。

しかし、1940年頃よりJanssenの理論式で設計されたサイロの事故が多くなり、内圧の再検討が加えられた。その結果、内容物の投入および排出に伴いJanssen式の数倍に値する内圧が作用することが判明した。これ以後、サイロ内圧の研究は、動態的および時間的推移の2点を考慮した解析に重点が置かれている。また、内容物の物性による内圧の影響も考慮されるようになった。

(3) 外国設計規準

外国のサイロに関する設計規準には下記のものがある。

ドイツ： DIN 1055, Blatt 6, 1964-11

“Lastannahmen für Bauten; Lasten in Silozellen”

ソ連： ТУ 124-56

米 国： ACI 313-77

" Recommended Practice for Design and Construction
of Concrete Bins, Silos, and Bunkers for Storing
Granular Materials "

仏 国： " RÈGLES DE CONCEPTION ET DE CALCUL DES SILOS EN
BÉTON "

これらの規準は、いずれも Janssen 式あるいは Reimbert 式より求めた内圧に、投入、排出
および形状の違いにより適当な修正係数（過圧力係数）を定め、それを考慮して設計内圧としている。

なお、わが国では日本建築学会で設計規準を現在、作成中である。

(4) サイロの見学

日本サイロ（千葉市）の鋼製円筒形集合サイロを見学し、現地にて調査した内容は下記の通りであ
る。

- 基礎（主にスカート部）と上部構造との接続の施工には十分な精度を要する。処理を誤ると外
壁に局部座屈が生ずる恐れがある。
- 気密性を高めるため、現場溶接は特に慎重を要する。
- 塗装は塩害に強い鉛系のもを使用する必要がある。

以上、調査概要を述べたが、他にも特殊構造のサイロ（ヘリコイダルサイロ、鉄板コンクリートサ
イロ）について報告があった。

4.2 発達の歴史

日本でサイロといえば、北海道の牧場風景が連想されるが、その起源は古く古代エジプトまで、さ
かのぼることができる。主として農業用貯蔵設備として発達し、野菜や飼料を詰め込み発酵させ、か
つ貯蔵する容器として使用された。今日では、粉粒体を扱う工業の過程に必要な貯蔵設備として、穀
類、セメント、砂利、鉍石、肥料、食塩などからカーボン、カオリン等特殊な粉体にまで広く利用さ
れている。

わが国で注目されるものは、ハンドリングサイロと呼ばれるもので、主として輸入穀類を対象に発
達し、昭和30年に20万 ton の収容力であったものが、昭和51年には200万 ton に達し、全
サイロの半数に達している。これは我々の栄養水準が質量ともに高度になったことに起因し、自給率
の低い日本では、食料、飼料を海外に依存せざるを得ず、これらの輸送機関としてバラ積専用船が着
目されると同時に、その受入港湾設備として大型サイロが数多く建設されるようになった。

このような大型サイロは、欧米はもとより日本においてもコンクリート製を中心に研究が進められ、
したがって、その建設数、量ともに多く、鋼製サイロは比較的小規模なものに限られていた。しかし、
穀類等のバラ荷の輸入原料が急増するに伴い、これを受け入れるサイロを地盤の悪い臨海の埋立地に

建設する必要上、構造体の軽量化と輸入穀類のガス燻蒸を行うための気密性が要求され、これに適合するものとして鋼製サイロが建設されはじめた。

鋼製サイロは、昭和40年頃より徐々に増え始め、現在では全サイロ収容力の $\frac{1}{4}$ を占めるにいたり、将来も鋼製サイロの需要は延びると予想されている(資料S-1, S-40)。

一方、サイロは狭い敷地に大量の粉粒体を収容でき、かつ、構造上合理的な貯蔵用容器として古くから研究されてきた。1895年にJanssenにより発表された理論は、サイロ底面に働く圧力が貯蔵物と壁面の摩擦力により大幅に低減されるというもので、その後の研究・設計の基礎となった。また、サイロの発達は構造材料の発達とも密接な関係があり、1855年、Bessemersの転炉による鋼の大量生産方法の発明、1867年、Monierによる鉄筋コンクリートの発明は骨組・板状その他自由な形状の構造物建設を可能にした。

こうして理論・構造材の発達により、次第に大型のサイロが建設されたが、貯蔵物排出時にホッパー上部を中心に亀裂・破損が生じるという事故が多発した。これは排出時に壁面に作用する動的な過圧力によるもので、静的な状態を扱ったJanssen理論の数倍の圧力が生じることが、実物のサイロや実験室での壁体圧力測定により確かめられた。

この動的過圧力の研究は、1940年頃から各国で始められた。1939年にはTaxTambilleB(ソ連)、1941年Reinbert(フランス)、1950年K/M(ソ連)、1963年Turitzin(米)、1968年Jenike(米)らにより研究が進められ各国の設計規準に反映されている。すなわち、ソ連では、TJ125-56「バラ物質用サイロ設計に対する工業条件」(資料S-19)とその後改訂された「CH302-65」、西ドイツではDIN1055, Blatt-6「建築物の設計荷重」の中にサイロ槽の圧力分布という章で(資料S-4, S-19)、アメリカ合衆国では、鉄筋コンクリート製を対象に「ACI規準粉体貯蔵用のコンクリート製ビン、サイロおよびバンカーの設計および施工指針」および「同解説」(資料S-26, S-29)、フランスでは、「RÈGLES DE CONCEPTION ET DE CALCUL DES SILOS EN BÉTON」が発表され、いずれもJanssen理論の2~5倍の動的過圧力が設計荷重として、みこまれている。

また、アメリカ鉄鋼協会でも鋼製サイロを対象に「鋼製ビンおよびホッパーに関するマニュアル」の整備が行われ、近く発表される予定である(資料S-28)。

わが国では、サイロの設計にあたり、この動的過圧力は諸外国規準あるいは独自の研究結果をもとに、考慮はされているものゝ統一された基準はなく、設計者の判断により処理されていた。しかし、日本建築学会では鋼製・コンクリート製を含めた容器構造物設計基準を近々発表する予定であり、また、土木学会においても研究が進められている。

4.3 サイロの分類

貯槽の名称には、サイロ、タンク、バンカー、ビン、ホッパーなどがあり、各名称の定義や区別をはっきりさせることは難しいが、ここにおける分類は、サイロを、穀物、セメント、鉱石、サイレージのような粉・粒物または固形物を有効かつ経済的に大量に収容できる高さの高い容器として扱う。

(1) 利用目的による分類

1) 供給用サイロ

貯蔵期間が比較的短かく、内容物の通関・検疫や集配送などの中継的役割をするもので、臨海地帯のハンドリングサイロおよび精粉、製油、醸造、飼料工場や各種化学鉱工業の工場などに附属するサイロなどである。これらのサイロでは、燻蒸のための気密性や内容物の投入・排出の機能性、機動性、耐摩耗性などが要求される。

2) 貯蔵用サイロ

長期の貯蔵、備蓄に供するもので、生産地の貯蔵サイロ、臨海地の輸入穀物などの備蓄用サイロなどである。これらのサイロでは、内容物の変質や害虫の発生を防ぐための気密性、耐水性、断熱性などが要求される。

3) 調質用サイロ

内容物の調質のために、サイロ内で乾燥させたり、発酵させたりして貯蔵するもので、産米地のカントリーサイロや生草、根菜類を発酵させ飼料として貯蔵するサイレージ用サイロなどである。これらのサイロにも気密性、断熱性、耐酸性などが要求される。

(2) 内容物による分類

1) 食糧・飼料用サイロ

a) 粒体用(穀物用)；米、麦、メイズ、マイロ、豆類、菜種など、比較的均質な流動性のある粒体を扱うもので、その投入・排出が容易で一時に大量の荷さばきが行われるのが一般である。害虫の駆除や吸湿などによる変質を防ぐための機能や投入・排出の機動性が要求される。

b) 粉体用；小麦粉、そば粉、澱粉、砂糖、食塩、ぬか、大豆粕、魚粉など、比重の小さい粉状のものを扱うもので、粉塵の発生、壁面への付着、アーチングによる排出性の悪さなどの問題があるので、サイロ内部形状の工夫や排出促進機構の装備などが必要である。

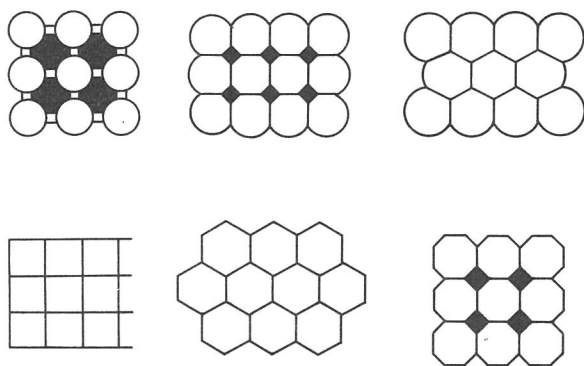
c) 塊体・繊維体用；チップ、ホップ、根菜類、ヘイキューブ、ペレットなどを扱うもので、それぞれの内容物により特殊な機能や装置が要求される。サイレージ用サイロでは、耐酸のためガラスライニングした鋼板を用いたりする。

2) 化学・鉱工業用サイロ；セメント、石灰、ソーダ灰、アルミナ粉、フライアッシュ、各種肥料などの粉体や、石炭、コークス、コンクリート骨材、各種の原鉱・鉱石などの粒・塊体の原料・製品を扱うもので、内容物により、気密・保温などを必要とする密閉式と、単に貯蔵または供給を目的とする開放式とがある。いわゆるケミカルサイロには、ステンレス鋼板を用いたものが多い。コンク

リート骨材用は、一般にピンと称し、コルゲートシートを用いた開放式のものもある。

(3) 形状による分類

- 1) 単独型；単体の独立したサイロで、その平面形状には、円形のものと同角形のものがある。
- 2) 集合型；単独サイロを林立させた形のものと同通壁式のものがあり、その平面形状は図一1に示すように様々である。



図一1 集合サイロの各種平面形状

◆部はベビーサイロ

- 3) 開放型；頂部が開放形状のもので、鉱石・骨材用のものに多い。
- 4) 密閉型；密閉構造のもので、気密性や保温性が要求される貯蔵物用のものである。
- 5) 平底型；平底を有するもので、排出しにくい貯蔵物用に多く、一般に特殊な排出装置を備えている。
- 6) ホッパー型；底部に漏斗状のホッパーを有するもので、粒体用サイロは一般にこの形式である。

(4) 使用材料および工法による分類

- 1) 鋼製サイロ
 - a) 鋼板溶接サイロ；鋼板製のユニットまたはブロックを溶接により組み立てるもので、最も一般的である。
 - b) ボルト締めサイロ；鋼製のユニットまたはブロックをボルト接合により組み立てるもので、バターサイロ、コルゲート骨材ピンなどがある。
 - c) リップサイロ；長尺のコイル鋼板をらせん状に成型し、接合部をハゼ接ぎするものである。
 - d) コルゲートサイロ；コルゲートシートを用いるもので、コルゲート骨材ピンなどがある。
 - e) らせん仕切板式サイロ；サイロの内部をらせん状の隔壁により仕切り多室形にするもので、ヘリコイダルサイロと呼ばれるものがある。
 - f) グラスライニング鉄板サイロ；グラスライニングを施した鉄板を使用するもので、サイレ

ージ用や化学用などがある。

鋼製サイロは、自重が軽く基礎工が軽減され、加工性、施工性もよいので、建設の経済化と工期短縮が計れる。また、耐震性、気密性、耐水性、耐摩耗性にも優れている。利用目的によっては、耐蝕性や断熱性に問題はあがるが、ライニングや、耐候性鋼材の使用または二重壁方式にすることなどで解決される。

2) コンクリート製サイロ

a) 鉄筋コンクリートサイロ；現物打ち鉄筋コンクリートが最も一般的で、その施工法には、ジャンピング工法、スライディング工法などがある。

b) P. C. サイロ；プレキャストのP. C. ブロックを積みあげるものや、P. C. 鋼線を巻きつけるプレラウンド工法によるものなどがある。

コンクリート製サイロは、自重が重いので鋼製に比べ一般に基礎工が過大となるが、耐蝕性、断熱性、耐火性には優れている。しかし、亀裂の発生は致命的な問題を起す可能性もある。また、気密性、耐湿性に劣るので内部にライニングを施す場合もある。

3) 鉄板コンクリートサイロ

内側の鉄板と外国の現物打ちコンクリートとを合成させるもので、コンクリートサイロの欠点を補ったものといえる。

4) その他の材料のサイロ

化学工業用のサイロには、内容物の性質により、ステンレス鋼板やアルミ板などを使用したものもあるが、材料費が高く、強度上の問題もあるので、特殊な場合の比較的小規模なものに限られる。

4.4 設計および施工法の現状

鋼製サイロの設計に関する規準は、現在のところわが国ではまだ確立されておらず、設計はメーカーあるいは設計事務所等が独自の考え方で設計しているのが現状である。

サイロの設計にあたって最も重要な問題は、貯蔵する粉粒体の内圧のとり方である。サイロの大型化ともなると、従来の Janssen 式に基づく設計荷重とは比較にならない大きな内圧が貯蔵物の排出時に発生し、サイロの破損事故が相継いで発生したため、この内圧上昇の問題を実験的にも理論的にも解明する努力が各国でなされ、最近ようやくその実態が明らかになった。その結果サイロ設計用の荷重のとり方について、アメリカ、ソヴィエト、ドイツ、フランスなどでは現在何らかの形で規準が設けられるに至った。

わが国では、先にのべたように各鋼製サイロメーカーが独自の設計を行っているが、貯蔵物の内圧はやはり Janssen 理論値の2倍以上をみているようである。サイロ形式は、貯蔵物の物性に適したものが選定されるため、平底式もホッパー式もともに用いられている。しかし、件数からみると穀物用が圧倒的に多いので、形式も穀物に適したホッパー式の集合サイロが数多く設計されている。使用鋼

材は、普通の軟鋼（SS41）が一般的で、食品関係等ではステンレス（SUS304）も用いられ、また、畜産用サイロはサイレーズ調整中に強い酸が生じるのでグラスライニングを施した鋼板が使用される。高張力鋼は用いられていないが、これは座屈によって板厚が制限されるため、高張力鋼としてのメリットがあらわれにくいことによるものである。また、使用される板厚は3.2mm～12mm程度で、4.5mmが使用頻度の多い板厚であり、サイロ半径Rと板厚tとの比は1/500から1/1,000というように非常に薄いものである。

地震に対しては、水平震度係数を0.2乃至0.3として設計されるが、粉粒体の減衰効果を考慮して8割程度まで水平力を低減することもある。空槽時の風圧によるオバリングおよび負圧による座屈を防ぐため、形鋼類でリング補強をする場合が多い。水平力による転倒はサイロ設計上の重要な問題である。円筒サイロの高さは直径の3～4倍もあり、しかも下部はホッパー下から貯蔵物を排出するために大きな空間があり、重心はかなり上にあがった状態になっている。これをスカートと称する円筒状の鋼板で支えているが、スカートにはコンベヤ貫通のための開口部が必ずあるので、地震時などには、このスカート部の座屈が設計の決め手となる。

基礎は支持杭方式が一般的であり、地盤改良は行われない場合が多い。基礎コンクリート根入れはあまり深くないにもかかわらず、支持杭頭への水平力は設計上あまり考慮されていなかったが、最近ようやく問題視されるようになってきた。共通壁を有する集合サイロでは、当然のことであるが、単体を並べた集合サイロでも、鉄筋コンクリート基礎盤は一体のものとし、転倒モーメントに対して有効にはたらくようにしている。

輸入穀物は、植物防疫法によって燻蒸することになっているため、穀物用サイロは気密性が要求される。この点では鋼製サイロは有利で、法定の気密度を保つのが容易である。

溶接は気密確保に有効な接合法であり、一般的に用いられるが、その他の接合法、たとえばボルト締めなども使用されている。

鋼製サイロの施工法は、建設機械の発達とともに変化してきている。クレーン車の大型化によって、鋼板を一定のブロックに地上組立てしたものを吊り込むようになってきた。大型のサイロではタワークレーンをサイロ中央部に設置して組立てをすることが多い。また、ジャッキアップ式では、サイロの屋根部分から地上で組立て、順次、ジャッキアップしながら地上で下へ下へと板を継ぎ足していく方法もある。リップ式サイロでは、ロール成形機を現場にセットし、鋼板コイルから直接サイロ外板を巻き建てる施工方法など、特殊な工法も出現してきている。

4.5 設計・施工上の問題

わが国では、鋼製サイロの設計・施工に関する総合的な指針等ははまだ確たるものは制定されておらず、鋼製サイロメーカーや設計事務所等が諸外国の基準や社内資料等に基づき、各々独自に設計施工を行っているのが実態である。

今後は、鋼製サイロの設計・施工指針等が整備されなければならないが、そのための基礎資料を得るためには、次のような問題点を解決していく必要がある。

- ① サイロの内容物による内圧の算定、特に内容物の排出時における内圧の算定
- ② サイロ本体の座屈問題
- ③ 耐震設計も含めた基礎の設計法の検討
- ④ コルゲート骨材ピンなどフェヌル・フロータイプのサイロに関する検討
- ⑤ 鋼板溶接サイロの現場溶接など施工時における問題

(1) サイロの内容物による内圧の算定

サイロ内壁に作用する内容物による内圧の算定、特に内容物の排出時における動的過圧力や負圧など動的な内圧の算定方法については、いろいろな提案式があるが、その理論的解明も十分でなく、今後とも調査研究を進めるべき内容を含んでいる。

また、近年サイロの大型化に伴い、サイロの付属設備である投入機器の能力増大が図られており、毎時間あたりの投入能力は大幅に向上している。

このため、投入時にサイロ内壁が受ける衝撃圧力も大きくなっており設計上検討を要する問題であると考えられる。

(2) サイロ本体の座屈問題

鋼製サイロ壁体の座屈荷重の算定方法については、まだ確立されておらず、また、研究も十分であるとはいえない。

特に、地震時における局部座屈の検討方法に問題があり、今後とも調査研究が必要である。

(3) 耐震設計も含めた基礎の設計法の検討

サイロ構造本体の設計に関する研究の進歩に比べて、サイロ基礎の設計についての研究がまだ十分であるとは考えられない。

特に、最近の大型サイロは、臨海地域の軟弱地盤地帯に建設されることが多く、このため地震時におけるサイロ構造本体の検討のみならず、その基礎まで含めた地震時安定性の検討についての調査研究を要する。

サイロ構造物を設置するために必要とする地盤の強度、すなわち地耐力は一般には 20 t/m^2 以上が必要である。これは地盤は単に常時の鉛直荷重を平均的に受けるだけでなく、地震時における集中荷重あるいはサイロ操業時における内容物の偏心荷重も受けるためである。

もし、地耐力が不足すると地盤の不等沈下によるサイロ本体の傾斜や狂い、あるいはサイロ壁体の局部座屈などが発生し、はなはだしい場合には倒壊などの事故を招くこともある。

特に、軟弱地盤地帯におけるサイロは、杭基礎とされることが多いが、この場合、杭長も従来の 20 m 程度から $40\sim 50\text{ m}$ と長くなっており、杭種や支持方式等の選定、許容沈下量の設定など解決すべき問題点が多い。

(4) コルゲート骨材ビンなどファネル・フロータイプのサイロに関する検討

従来サイロに関して行われた研究によれば、サイロの内容物である粉粒体をサイロ底面から排出する場合の粉粒体の流れには、ファネル・フロー (funnel flow) とマス・フロー (mass flow) の2種類あることが観察されている。

マス・フローとは、粉粒体排出時に底部排出口を開いても、粉粒体の中心部に内容物の表面に達するような流れの柱は形成されず、全体として筒状のまま降り落ちる形で流出する現象をいう。

(図-2参照)。

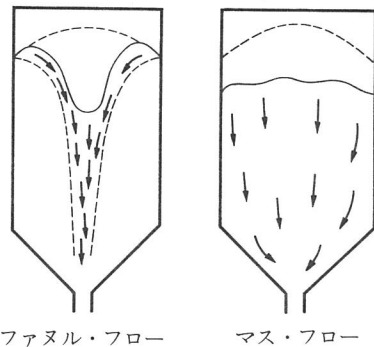


図-2 粉粒体排出の2つのパターン

コルゲート骨材ビンでは、一般にファネル・フロー、すなわち、内容物の中央部に煙突状の通路ができてこの中を通り上部から順次排出される状態が生じる。

(図-2参照)。

これまでのサイロの内圧に関する理論的研究の対象はほとんどマス・フロー型のサイロである。これは、マス・フロー型サイロの有するいろいろな利点のためであるとも考えられるが、主として数学的取扱いが容易であることにもよるといわれている。

しかしながら、コルゲート骨材ビンのように底面排出口を有する平底円筒ビンで壁面の摩擦の大きいものでは

内容物のアーチ作用やパイプ作用などの問題もあり、ファネル・フロータイプのサイロの設計法についての検討は今後の課題として残されている。

(5) 鋼板溶接サイロの現場溶接など施工時における問題

鋼板溶接サイロの場合、薄鋼板の現場溶接施工は重要な問題であるが、現在では妥当な基準等がなくサイロメーカーが各自社内基準等に等づいて実施している。したがって、現状にそくした現場溶接施工管理基準を設定し、溶接施工の品質向上を図る必要がある。

また、サイロ本体の現場組立て作業中に、台風などの異常事態が発生した場合の処置など、現場組立て作業に関する施工管理基準を作成することについての検討も必要であると考えられる。