

4. 調査研究結果

4.1 調査概要

わが国は、近年大量の穀物を輸入しており、その輸入量の増加に伴い、近代的な穀物バラ荷受保管設備の増強も急速に進んでいる。これら設備の一つである大型サイロは、欧米はもとより日本でもコンクリート構造を中心に研究開発が進められて来たが、近年、穀物のバラ荷輸入が急増した結果、これを受け入れるサイロも、港湾に近い地盤の悪い埋立地に建設する必要が生じた結果、軽量でガス燻蒸時に気密性のある鋼製サイロが注目され、その建造数は年々増加し、現在では全サイロ収容力の $\frac{1}{4}$ を占めるに至り、将来も鋼製サイロの需要は伸びると予想されている。

このように鋼製サイロの建造数は増加しているが、その設計、施工に関する総合的な指針等はまだ確たるものが制定されておらず、鋼製サイロメーカーや設計事務所が諸外国の基準や自社内資料等に基づいて、各々独自の設計施工を行っているのが実状である。したがって、設計者によって可成りの差が生じることもありうる状態である。

以上のような状況のもとに、土木学会では昭和52年度より社団法人鋼材倶楽部の依頼を受け、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、調査を行った。昭和52年度に行った主な調査を列記すると

- (1) サイロ建設の歴史的経過
- (2) サイロ設計法の発展
- (3) 外国設計規準の調査
- (4) サイロの見学

であり、その結果を「鋼製サイロに関する調査研究報告書」(昭和52年度)に報告している。

昭和52年度の調査の結果、今後、鋼製サイロの設計、施工指針等を整備するための基礎資料を得るために、次の5項目を解決していく必要のあることが判明した。

- (1) サイロの内容物による内圧の算定
- (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) コルゲート骨材ビンなどファヌル・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

昭和53年度も、昭和52年度に引き続き、鋼材倶楽部の依頼を受けたので、上記5項目について調査を行うことにしたが、特に(1)と(2)のテーマについて重点をおいた。内外の諸文献を更に収集し、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) サイロの壁面に作用する粉体圧

サイロの壁面に作用する粉体圧については、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 の理論式が提案され、採用されていた。しかし、1940年頃から Janssen の理論式で設計されたサイロの事故が多発し、内圧の再検討が加えられた結果、内容物の投入および排出に伴ない Janssen 式の数倍に値する内圧が作用することが判明した。その後の研究で、粉体圧はサイロの形状、内容物の物性、内容物の投入、排出条件等の条件によってその大きさが決定されることが判ったのだが、統一的な計算式は確立されていないのが現状である。本年度は、各国のサイロの設計基準に採用されている計算式や提案されている実験式の基礎となっている理論ならびに特長を整理し、合わせて深い円形サイロの一例について水平方向粉体圧を計算して比較を行った。

(2) サイロ壁面の座屈に関する考察

鋼製サイロの側壁は、サイロ直径に比べ板厚が極端に薄いことから、種々の荷重状態で座屈が発生する。一番多いのは、排出時に負圧になって局部座屈を起すことで、現在は一般に設計荷重を 150 kg/cm^2 程度とし、それ以上になると安全弁を操作している。破壊に至ることは少なく、空気を入れて直るケースが多い。次に、排出時に圧力が増大して、ちょうちん座屈が発生することがある。最近では排出時の圧力を計算して対処できるようになっている。もう一つは、アンカー部の不等沈下による座屈で、アンカー部の施工ミスに起因することが多い。これら座屈に対しては、各国の規格に座屈規定があるので、諸文献の調査を行い、サイロ壁面の座屈に関する考察を行っている。

(3) サイロ本体の応力解析法の提案

鋼製サイロの設計法はまだ完全に確立されておらず、メーカーが内外の文献を参考に独自の方法で行っている。

アメリカのイリノイ大学の Boresi と Jerath は風荷重を受ける屋根付平底円筒貯蔵ビンをシェル曲げ理論によって解析する方法を提案している。この方法はサイロをリング状のセグメントに分割し、変位を円周方向にはフーリエ級数に展開し、子午線方向には3次の区分多項式で近似することによって残差法を用いて近似解を求めているが、この方法では解析に用いる接合部のバネ定数が不明確であり、また、端部での境界条件などを含めて汎用性に欠けている。そこで、有限要素法を用いて非対称荷重を受ける鋼製サイロを解析することを試み、微小変位理論による定

式化をし、他の計算例と比較するために例題の解析を行った。その結果、本解析手法がサイロや他の非対称荷重を受ける軸対称シェルの解析に用いて、合理的にかつ精度よく評価できることが判った。

(4) 参考とした重要な研究の紹介

本年度に収集した各種文献のうち、鋼製サイロの研究に特に重要と思われる文献を選定して紹介する。

i) 小麦粉によるサイロ荷重

サイロの研究者として国際的に評価されている Pieper の論文で、圧縮性が大きく、粘着性がそれほど小さくなく、感湿性があるため流れにくい材料であるため、注意を要する小麦粉用サイロの設計法を紹介している。

ii) On the Theory of Bin Loads

Jenike と Johanson が発表した論文で、サイロの圧力をマスフロー、ファンルフロー共系統だてて説明しており、アメリカでも多く引用されており、妥当性がある。

iii) Buckling of Axially Compressed Cylinders

サイロ壁面の座屈問題について、過去に行われた数多くの試験結果をまとめた Miller の論文。

(5) 基礎に関する調査

基礎に関しては、現状を調査した程度で、特に設計方法の提案とか、指針作成に参考となる研究はできなかった。

現在、建設されている鋼製サイロの基礎工法は、そのほとんどが支持杭方式であり、支持層が深い場合には摩擦杭とすることもある。杭材としては高強度コンクリートパイルが多く、鋼管杭がこれに次いでいる。増設サイロの基礎にベノト杭を用いたこともあるが、これは既設サイロへの振動の影響を避けるためである。支持層の浅い場合に直接基礎とすることもあるが、これは稀なケースである。地盤改良によるフレキシブルファンデーションは浅槽の大型平底サイロにのみ採用される。

支持層としてはN値50以上を目安とし、N値40程度でも支持層が厚ければこれに支持させる。圧密沈下計算は通常おこなっていない。薄い砂礫層がシルトや粘土と何層にも層をなして、強固な支持層がGL-40m程度の所になくはない場合は、特定の砂礫層をえらんで先端支持させるか、摩擦杭として計算する。このような場合、コンクリートパイルは打込中に発生する引張亀裂が原因で、打撃力により破壊することがあるので鋼管杭が望ましいが、現状では経済的理由から高強度パイルが多く用いられる。杭頭水平力の処理は最近になって検討されるようになったか、従来はRC

フーティングの根入れ部の受働土圧で水平力を受けるとして、杭頭水平力を無視する設計がほとんどであった。

GL - 5 m程度より上に支持層のある場合は、その層まで掘削をして直接基礎としている。

(6) ファヌル・フロータイプのサイロに関する検討

粉粒体の排出時の流れには、ファヌル・フローとマス・フローがあり、一般の鋼製サイロではマス・フローが採用されている。したがって、サイロの内圧に関する理論的研究はマス・フローがほとんどで、ファヌル・フロータイプのサイロの設計方法はあまり検討されていない。

ファヌル・フロー型のサイロとして代表的なのは、コルゲートシートで作った骨材ビンである。現在、この骨材ビンの設計はメーカーが独自に行っている。

一般に考慮している荷重は、骨材の水平圧力と鉛直圧力、地震荷重と風圧で、内容物の投入時排出時におけるサイロ内圧の割増しは考慮していない。これは骨材の取出し口がビン中心部にあるため、骨材の安息角に相当する範囲でビン底面にデッドストックが常にあること、内容物が骨材に限定されていることによる。

水平圧力、鉛直圧力の計算には Janssen の式が用いられており、これらの力は山形鋼の補強材とコルゲートシートによって支持されている。

資料 (S -32) 「コルゲートシートによる骨材貯蔵ビンの応力解析について」には、コルゲート骨材ビンが骨材排出時にファヌル・フロータイプとして挙動を示すことについて記述されているが、これによるとサイロ内圧の変動は、現行の標準設計の安全率の範囲内におさまっている。なお、骨材ビンの設計法の中に、ファヌル・フロータイプとしての特性をどのように反映するかについては、現在では資料も見当らず、今後の検討課題になっている。