

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

ON THE STRESS ANALYSIS OF THE STORAGE BINS MADE OF CORRUGATE SHEETS

小野 一良*・加藤 景一郎**・成瀬 忠明***・伊藤 義男****
By Kazuyoshi Ono, Keiichiro Kato, Tadaaki Naruse and Yoshio Ito

1. 緒 言

コルゲートシートは外圧を受ける構造物の材料としては非常に有利な性質を備えているが、最近はコンクリート骨材の貯蔵ビン、護岸用セル、築島など内圧を受ける構造物としても広く使われるようになった。このように内圧を受ける円筒状の構造物としては構造力学上平鋼板が有利とされているが、コルゲートシートが使われる理由は工場で加工した後に現場に輸送中に曲率が変化することが少なく、組立てが容易なためと考えられる。しかしながら、コルゲートシートで作られた円筒状の構造物に骨材を填充した場合の応力解析について発表されたものはほとんど見当たらない。

一般に大型の貯蔵ビンにおいては骨材の投入時または地震のときに生ずる偏圧を考慮して外側に縦方向の補強材を入れるのを例とするが、この効用について不明の点が多く、また貯蔵ビンに填充した骨材の重量の何パーセントが周辺の壁で支持されるかについても明らかではない。特に貯蔵ビンの底から骨材を抜く場合などを考慮すればますます複雑となる。

これらの点を解明し、コルゲートシートによる骨材貯蔵ビン設計の指針を作るためこの研究を行なった。

2. 応力解析

一般にコルゲートシートを用いて作った管状の構造物が軸方向の圧力を受けるときにはコルゲートシートの波の山および谷が曲げを受けるため波の山においては管の直径が増し、谷においては直径が減る。これに伴って波

の山においては円周方向の引張りを生じ、波の谷においては圧縮を生ずる。この影響を受けて波の山および谷に生ずる曲げが軽減されると考えられるが、この問題について次に計算を行なう。

コルゲートシートの波の形を中心線に対して対称であると仮定し、コルゲートシートの単位幅に対して C なる圧力が軸方向に作用した場合にこのコルゲートシートが受ける半径方向の移動量を $\eta(x)$ とする。図-1 をコルゲートシートの波の貯蔵ビン外方に凸出した半波長を示す図とし、貯蔵ビンの半径を R とすれば図の A 点における半径は変形の結果 $R+y$ から $R+y+\eta$ に増加したことになる。よってコルゲートシート上における A 点を中心とした長さ ds の部分は円周方向に

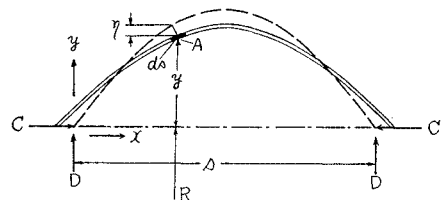


図-1 コルゲートシートの変形

$$dT = \frac{Et\eta}{R+y} ds \dots \dots \dots (1)$$

なる張力を受けることになる。ここに t を板の厚さとする。このような張力が円周方向における長さ $(R+y)\theta$ なる部分の両端に作用すればこの合力は図-2 に示すごとく円の中心に向う θdT なる力となる。よって円周方向の単位長さ当りに円の中心に向う力は

$$\frac{\theta dT}{(R+y)\theta} = \frac{Et\eta}{(R+y)^2} ds \approx \frac{Et\eta}{R^2} ds \dots \dots \dots (2)$$

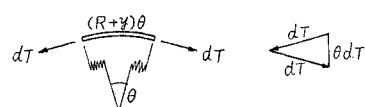


図-2 コルゲートシートに生ずる円周方向の張力

* 正会員 工博 金沢大学教授 工学部土木工学科
** 正会員 川崎製鉄株式会社 建材部
*** 正会員 川崎製鉄株式会社 建材部
**** 正会員 金沢大学工学部 土木工学科

となる。以上を要するに円形に曲げたコルゲートシートが軸方向の力を受けて半径方向に η だけ変形した場合には円の中心に向かって式 (2) で示す力が作用し、この力によって自由な変形が阻止される。ただし上式の右辺においてはコルゲートシートの波の高さが貯蔵ビンの半径に比べて十分に小さいと仮定して R に対して η を無視している。

以上はコルゲートシートの外方に凸出した半波長について論じたのであるが、内方にへこんだ半波長についても符号を正負反対にするだけで同様な関係が成立する。よって貯蔵ビンの直径がコルゲートシートの波の高さより十分に大きいときには外方に凸出した半波長に対して波の節に生ずる反力 D と内方にへこんだ半波長に対して波の節に生ずる反力 D とはつりあいを保ち、波の節には曲げモーメントを生じない。

いまコルゲートシートの波を貫く中心線上に x 軸を採り、波の形を $y(x)$ で表わし、

$$\varphi(x) = \left\{ 1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right\}^{1/2} \dots\dots\dots (3)$$

と置けば単位幅のコルゲートシートの任意の点 x に生ずる曲げモーメント M は次式によって計算される。

$$M = Cy(x) - Dx + \int_0^x \frac{Et}{R^2} \eta(z)(x-z)\varphi(z) dz \dots\dots\dots (4)$$

コルゲートシートの波の形を波の山に対して左右対称とすれば次式が導かれる。

$$D = \frac{1}{2} \int_0^s \frac{Et}{R^2} \eta(z)\varphi(z) dz \dots\dots\dots (5)$$

これまでではコルゲートシートの単位幅について論じてきたが、実際には曲板の曲げの問題となるので鋼板のポアソン比を ν とし、板の剛度を

$$N = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \dots\dots\dots (6)$$

と置けば任意の点における移動量 η は次式によって計算される。

$$\eta(z) = Vz - \int_0^z \frac{z-x}{N} M \varphi(x) dx \dots\dots\dots (7)$$

ただし

$$V = \int_0^s \frac{s-x}{Ns} M \varphi(x) dx \dots\dots\dots (8)$$

上式で示された V は節点における $d\eta/dx$ を表わしている。

式 (4), (5), (7), (8) を解いて M および η が求められるはずであるが、これは簡単には計算できない。 D および V を適宜に仮定して式 (4), (7) より M および η を求め、これらの値を式 (5) および (8) に代入して D および V を求める。これが当初仮定した D および V に一致するまで何回も繰返して計算を行なう要があ

る。

以上の過程によって M および η が求められたときにはコルゲートシートの波に直角方向に生ずる曲げ応力 σ_b とコルゲートシートの円周方向に生ずる引張応力 σ_t とは次式によって計算することができる。

$$\sigma_b = \frac{6M}{t^2}, \quad \sigma_t = \frac{E\eta}{R} \dots\dots\dots (9)$$

コルゲートシートの波に直角の方向における曲げひずみ ϵ_b および円周方向の引張りひずみ ϵ_t は次式により表わされる。

$$\epsilon_b = \frac{Mt}{2N} - \frac{\nu\eta}{R}, \quad \epsilon_t = \frac{\eta}{R} \dots\dots\dots (10)$$

一般に構造物の応力測定においてはひずみ量を測定してこれに弾性係数 E を掛けて応力と見なす場合が多いので、このような方法で曲げひずみからコルゲートシートの見掛け上の曲げ応力 σ_b' を求めたとすれば

$$\sigma_b' = \frac{EMt}{2N} - \frac{E\nu\eta}{R} \dots\dots\dots (11)$$

となり、この中には円周方向の張力の影響が入っている。

コルゲートシート貯蔵ビンの円周方向の単位幅について軸方向に C なる圧力を掛けた場合にコルゲートシートの半波長が軸方向に生ずる圧縮量 Δs は次式によって計算される。

$$\Delta s = \frac{1}{N} \int_0^s My \varphi(x) dx \dots\dots\dots (12)$$

$\Delta s/s$ が貯蔵ビンの軸方向の圧縮ひずみを表わすので、 $Cs/\Delta s$ が壁の剛度となる。

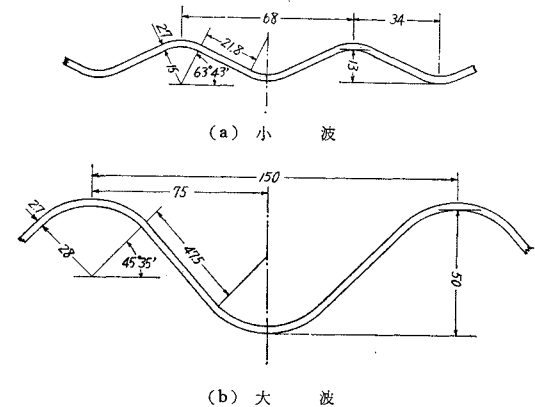


図-3 コルゲートシートの形状および寸法

図-3 (b) に示すときコルゲートシートによって種類の半径の貯蔵ビンを作り、 $C=1 \text{ kg/cm}$ として上記の諸式によってコルゲートシートの波の山における曲げ応力 σ_b, σ_b' 、波の山における円周方向の引張応力 σ_t および軸方向における圧縮量 $\Delta s/s$ を計算した結果を図-4 に示した。この図の下方に $\sigma_c=3.70$ と記入した点線は

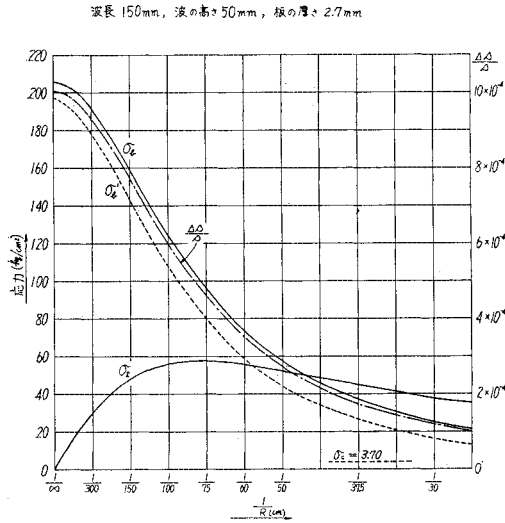


図-4 貯蔵ビンの壁に生ずる曲げ応力ならびに引張応力(大波コルゲートシート)

直圧力によってコルゲートシートの波の山に生ずる圧縮応力である。

図-4 に示すごとく貯蔵ビンの直径が小さくなれば曲げ応力 σ_b が急に小さくなる。半径 75 cm の貯蔵ビンにおいては波の山に生ずる曲げ応力は円周方向の張力が作用するため張力のない場合すなわち半径無限大の場合の半分以下となる。また円周方向の張力 σ_t は半径 75 cm の場合に最大となる。

この図においてコルゲートシートの圧縮量 $\Delta s/s$ を示す線は σ_b にほぼ平行しており、同一の圧力を受けてもコルゲートシートの圧縮量は直径の小さいほど少なくなることが認められる。

3. 実験装置ならびに測定方法

実験室内にコルゲートシートまたは平鋼板を用いて直径 1.5 m, 高さ 1.9 m の骨材貯蔵ビンを作った。この貯蔵ビンを小型の貯蔵ビンと呼び、野外に設けた直径 2 m の貯蔵ビンと区別する。

コルゲートシートとしては図-3 に示す2種類を使ったが、これを大波または小波のコルゲートシートと呼ぶことにする。いずれも補強材は使用しなかった。

今回貯蔵ビンの材料として使用した大波のコルゲートシートは1枚の幅が 95 cm であり、小波は 61 cm で厚さはともに 2.7 mm とした。いずれも半円形に加工した後ボルト締めまたは溶接によって結合した。貯蔵ビン底面の中央部に 20×40 cm の排出口を設けた。

写真-1 および図-5 に示すようにこれら貯蔵ビンの2個を台上に据え付け、両貯蔵ビンの中間にバケツ

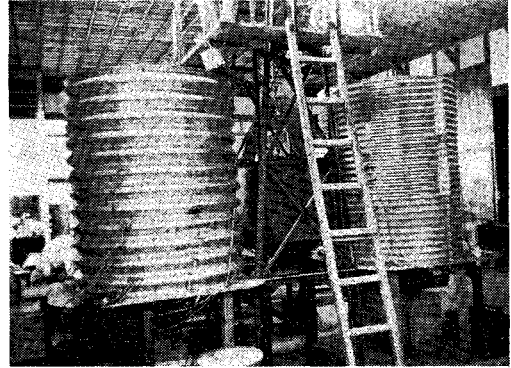


写真-1 大波および小波コルゲートシートによる貯蔵ビン

の昇降路を設けた。一方の貯蔵ビン(A)の底から骨材を抜き出し、シュートによってバケツに受け、電動チェーンブロックで巻き上げて他方の貯蔵ビン(B)の上からシュートによって骨材を流し込んだ。バケツ1杯の容量は約 0.5 m³ であったのでバケツ7杯で砂利を入れかえることができた。

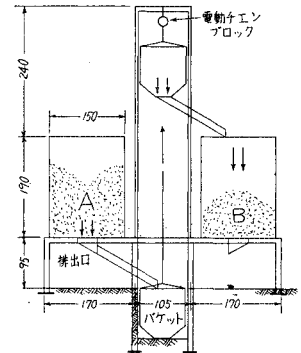


図-5 貯蔵ビンに骨材を填充および抜き出す装置

骨材を貯蔵ビンに填充し、または引き抜くときにコルゲートシートに生ずる引張応力および曲げ応力を測定するために貯蔵ビン外側の周辺に多数のワイヤストレインゲージを貼り付けた。また貯蔵ビンの壁面および底面が受ける土圧を測定するため土圧計を取り付けた。これらの計器の取り付け状態の一例を図-6 に示した。図に示すごとく同一高さで4枚のストレインゲージを90°間隔にコルゲートシートの山および谷に垂直方向および水平方向に貼り付けた。また貯蔵ビンの高さ方向には3段階とした。貯蔵ビン側面および底面には共和電業製土圧

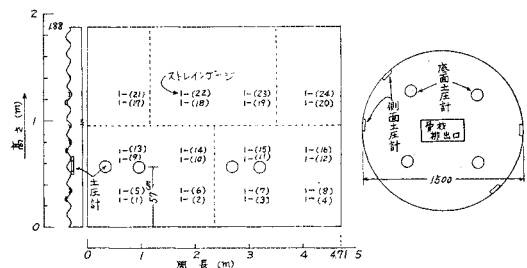


図-6 大波貯蔵ビン(溶接結合)展開図および平面図

変換器 SPB-A 型を使用した。

貯蔵ビンにバケツ 1 杯の骨材を入れ、または抜き出すごとに砂利の表面を平に均し、その高さを記録し、各種計器の測定を行なった。特に砂利を抜き出す当初において貯蔵ビンの受ける圧力が急に变化するので砂利を少量ずつ引出しながら測定を繰り返した。

使用した骨材は粒径のまるい 2 種類のふるい砂利と乾燥した砂で、これらの粒度曲線を 図-7 に示した。なお中砂利および小砂利の単位体積重量は 1700 kg/m^3 であり、砂は 1670 kg/m^3 であった。

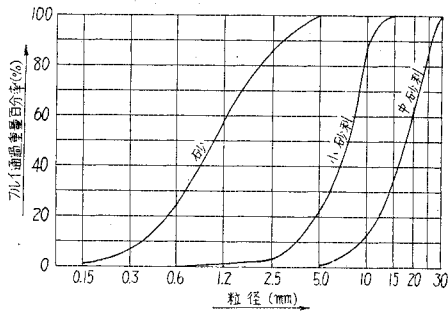


図-7 骨材の粒度曲線

4. 小型貯蔵ビンに対する骨材填充試験

(1) 溶接結合による大波貯蔵ビンについて

溶接結合による大波貯蔵ビンに中砂利を填充し、これに続いて抜き出すときに貯蔵ビンの壁に生ずる垂直曲げ応力と円周方向の引張応力を測定した結果を 図-8, 9, 10 に示した。図-6 にゲージの貼り付け位置と番号との関係を示したが、この中で波の山および谷に垂直方向に貼り付けたゲージに V, 水平方向に貼り付けたゲ-

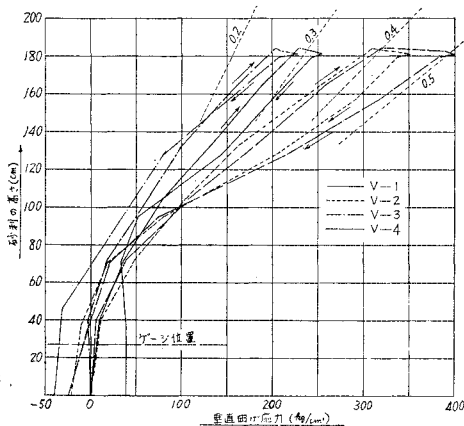


図-8 コルゲートシートに生ずる曲げ応力
溶接結合、大波貯蔵ビン、中砂利

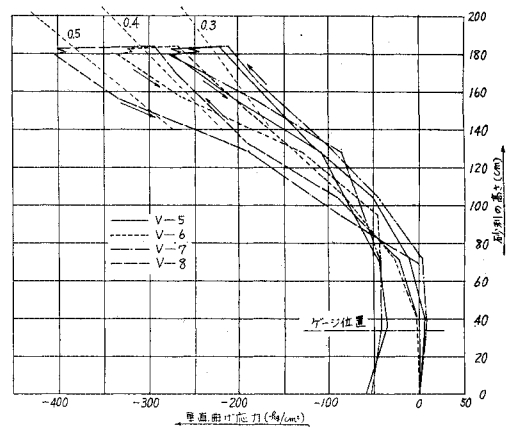


図-9 コルゲートシートに生ずる曲げ応力
溶接結合、大波貯蔵ビン、中砂利

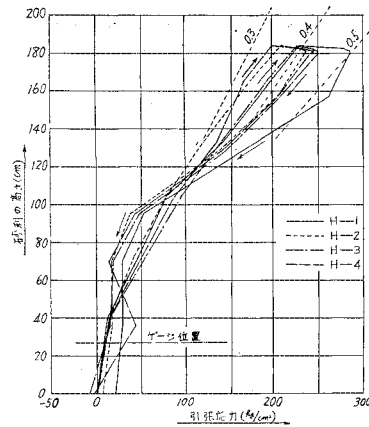


図-10 コルゲートシートに生ずる引張応力
溶接結合、大波貯蔵ビン、中砂利

ジに H なる符号を付けた。

図-8, 9 に示した曲げ応力は単に曲げひずみにヤング係数を掛けて求めた見掛け上の曲げ応力であり、さきに述べたごとく円周方向の引張または圧縮応力を考慮に入れば実際の曲げ応力はこれよりいくらか大きくなるはずである。また貯蔵ビンの中の砂利の高さがゲージ取り付け位置を越えると曲げ応力が増加し始めるが、これは貯蔵ビンの壁とこの中に填充した砂利との間の摩擦力によって砂利の重量の一部を壁が負担することを示している。砂利の高さが増すほど曲げ応力の増加の割合が急になるのは壁の分担する割合が次第に多くなったことを示している。なおこれらの図にはゲージを貼り付けた位置より上部の砂利の重量の何%が側壁によって支持されたかを示す線を 2. によって計算して点線で記入した。

図-8 によれば砂利の表面が貯蔵ビンの天端近くに達したときにグラフの線の勾配は 50~60% の線にほぼ平行している。砂利が満杯に達したときに砂利の重量の

25~40% が貯蔵ビンの壁によって支持されているが、貯蔵ビンの底部より砂利を抜き出す当初において急に曲げ応力が増加し、貯蔵ビンの壁の分担割合が 29~50% に達することが示されている。

図-9 はコルゲートシートの谷に生ずる曲げ応力を示したが、この図によれば砂利を貯蔵ビンの天端まで填充したときに砂利の重量の 27~37% を側壁で分担していたが、砂利を抜き出す当初に急に曲げ応力が増加し、砂利の重量の 37~53% が側壁に伝達されたことが認められる。

図-10 はコルゲートシートの山に水平方向に貼り付けたゲージによる測定記録で円周方向の引張応力を示している。この図によって貯蔵ビンの底面より砂利を抜き出す初期に急に応力の増加することが認められる。図-10 によれば砂利を填充し終ったとき砂利の重量の負担率が 34~39% であったが、引出す当初急に増加して 41~50% の負担率となり、図-8.9 に示した結果にほぼ一致している。

図-11 には貯蔵ビンに砂利を填充し、これに引続いて抜き出す過程において貯蔵ビンの底面および側面が受ける圧力を測定した結果を示す。この図によれば砂利の面が貯蔵ビンの底面より約 70 cm の高さに達するまでは底面の受ける土圧は砂利の重量の 60~70% に相当するが、砂利の表面がこれより高くなるにしたがって次第にその割合が低下し、砂利層が貯蔵ビンの天端に達するときには約 50% の重量が底面にかかることが示されている。貯蔵ビンの側壁が受ける圧力は図-6 に示すごとく底面より 57 cm の高さに 4 個の土圧計を取り付けて測定したが、砂利の表面がこの高さを越えてから圧力の増加が見られる。その増加割合は砂利の高さが土圧計の上方約 50 cm に達するまでは 0.06~0.07 kg/cm²/m となっているが、その後漸次低下して満杯時には約 0.03 kg/cm²/m となり、当初の増加率の 1/2 以下に低下している。なお計器上の砂利の高さを同一として底面の圧力と比較すれば側壁にかかる圧力は垂直土圧の約 1/2 となっている。砂利を貯蔵ビンの底面より抜き出す際底面の土圧、側面の土圧ともに急に圧力が増加した場合と低下した場合があるが、その変化は比較的に僅少である。砂利を抜き出すときには砂利が下方に移動するにともないアーチ作用がより強く働き、側壁の圧力が増加して底面が受ける圧力が減少する傾向を期待したのであるが、図-11 ではこの点が明らかではない。これは圧力の測定位置が底面に近過ぎたためいわゆるデッドストックの中にあり、アーチ作用によって側圧が増加するのは少なくとも貯蔵ビンの半径に相当する高さ以上になると想像される。

小砂利を貯蔵ビンに填充し、または底面より抜き出し

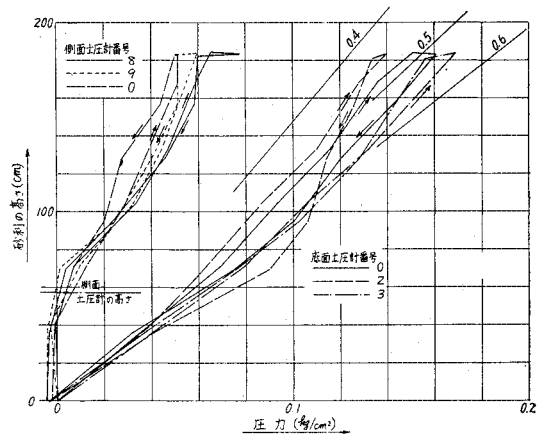


図-11 貯蔵ビン側面および底面に生ずる圧力
溶接結合、大波貯蔵ビン、中砂利

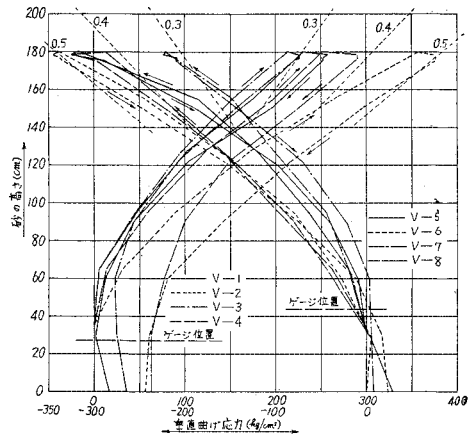
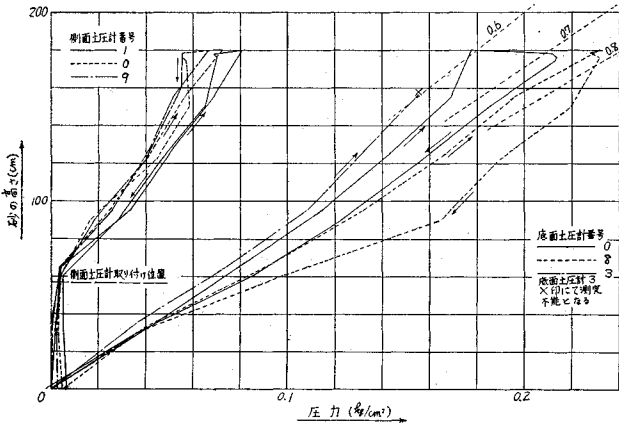


図-12 コルゲートシートに生ずる曲げ応力
溶接結合、大波貯蔵ビン、砂

た場合についても同様な測定を行なったが、中砂利の場合にはほぼ一致した記録が得られた。

十分乾燥した砂を使って同様な測定を行なった場合にコルゲートシートの山や谷に生ずる曲げ応力の測定結果を図-12 に示した。この図によれば砂の表面が高くなるにしたがって貯蔵ビンの壁が砂の重量を負担する割合が次第に増加し、その傾向は中砂利または小砂利を使用したときとほとんど一致している。また貯蔵ビンの底面から砂を抜き出すとき側壁に生ずる曲げ応力および円周方向の引張または圧縮応力は急に増加するが、その増加量は砂利の場合に比べていくらか少ない。

貯蔵ビンに砂を填充し、または引き抜くとき底面と側面に生ずる圧力の測定結果を図-13 に示したが、底面が受ける土圧はほぼ直線的な変化を見せ、その大きさは砂の重量の 60~76% に達する。この数値は砂利の場合(図-11)よりいくらか大きな圧力を示している。



図一13 貯蔵ビン側面および底面に生ずる圧力
溶接結合、大波貯蔵ビン、砂

以上中砂利、小砂利、砂の3種類の骨材について貯蔵ビンの壁と骨材との間の摩擦によってコルゲートシートに生ずる垂直曲げ応力あるいは貯蔵ビンの軸方向の圧縮に伴って生ずる円周方向の引張応力の測定結果を比較したが、粒径による差はほとんど認められなかった。しかし貯蔵ビンの底面が受ける土圧について2種類の砂利使用の場合と砂使用の場合とを比較すれば砂がもっとも大きな圧力を示して、小砂利がこれにつき、中砂利がもっとも低かった。このような結果を生じた理由は一般に粒度が粗くなれば内部摩擦角が大きくなるのでいわゆるアーチ作用がより強く働いて中央部の骨材の重量をも貯蔵ビンの側壁が負担することになり、底面が受ける圧力が減少されるものと考えられる。また図一11によれば底面の受ける圧力は砂利の高さが増すにしたがって次第に増加割合が減少するが、小砂利の場合および砂の場合においては底面の受ける圧力は骨材の高さにほぼ比例している。これも中砂利は内部摩擦角が他の骨材より大きいのでアーチ作用が強く働いたためと考えられる。この傾向は図一8に示すごとくワイヤストレインゲージによる記録においても認めることができる。

(2) ボルト締め結合による大波貯蔵ビンについて

一般にコルゲートシートによって貯蔵ビンを建造するときにはコルゲートシートを溶接して結合するよりもボルト締めによって結合する場合が多い。よってボルト締めで結合した貯蔵ビンについてもさきと同様な測定を繰り返した。貯蔵ビンに小砂利を填充し、または抜き出す過程においてコルゲートシートに生ずる曲げ応力を測定した結果によれば溶接結合の場合に比べて一般に応力が10~25%小さく出ている。この原因としてはボルト締めの場合には結合部においてコルゲートシートが重ね合わされているのでここで補強されたことになり、自由な

変形が妨げられるためと考えられる。特に垂直方向の結合部の存在によって垂直曲げ応力が軽減されることになる。なお貯蔵ビンの底面および側面が受ける圧力の測定結果は溶接結合による貯蔵ビンにほぼ一致した。

(3) 小波貯蔵ビンについて

小波のコルゲートシートを溶接またはボルト締めで組立てた貯蔵ビンについても大波の貯蔵ビンの場合と同様な測定を行なった。

ワイヤストレインゲージによる測定結果によれば砂利を貯蔵ビンの天端まで填充したときに砂利の重量の18~34%が側壁によって分担され、砂利を抜き出すときには急に分担の割合が増加し18~44%となる。これらの数値は大波貯蔵ビンの場合に比べてはるかに小さい。これは小波のコルゲートシートと砂利との間の摩擦抵抗が小さくなったことを意味している。

底面が受ける圧力を測定した結果によれば砂利を貯蔵ビンの天端近くまで填充したときに砂利の重量の50~70%が底面に負担され、大波の場合と比較すればいくらか大きな値を示している。これもさきと同様な理由と考えられる。

(4) 平鋼板による貯蔵ビンについて

厚さ1.6mmの鋼板を円筒状に曲げて溶接し、直径1.5m、高さ2mの貯蔵ビンを作り、この貯蔵ビンについても小砂利を填充または抜き出す過程に貯蔵ビンの側壁が受ける応力を測定したが、その測定値はきわめて小さく、ワイヤストレインゲージでは測定誤差の範囲内に入るためその結果を記すことを省略した。

5. 空の貯蔵ビンに対する加圧実験

2.にコルゲートシートで作った貯蔵ビンの壁が上下方向の圧力を受けたときに生ずる曲げ応力その他の計算方法を述べたが、ここでは貯蔵ビンに空にして側壁に軸方向の圧力を加え、コルゲートシートに生ずる曲げ応力その他を測定し、これがさきの計算値にどの程度一致するかを確かめた。

実験装置としては図一14に示すごとく直径1.5m、高さ1.9mの貯蔵ビンに空にしてその上縁に多数の桁を並べて周辺に一樣な荷重が分布されるようにした。この上に荷重測定用のループ式圧力計をのせ、この上に渡したIビームの両端より丸棒をジャッキによって下向に引くのであるが、この場合にも多数の桁を用いて圧力が貯蔵ビンの下縁に一樣に分布されるようにした。貯蔵ビ

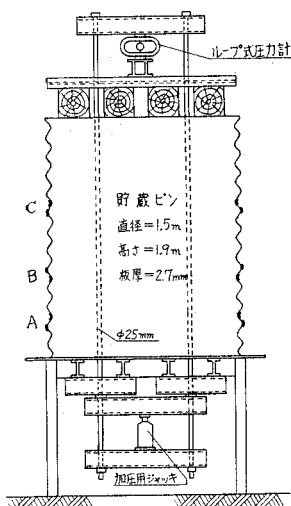


図-14 空の貯蔵ビンに対する加圧実験装置

ンの上縁近くでは桁とコルゲートシートとの接触状態により圧力の分布がやや均等を欠くが、貯蔵ビンの中央以下では等分布するものと考えられる。

ジャッキによって垂直荷重 1t 加えるごとにコルゲートシートに生ずる曲げひずみまたは引張および圧縮ひずみを測定し、これより見掛上の曲げ応力、引張および圧縮応力を求めた。

溶接結合による大波の貯蔵ビンを加圧した

とき測点 A (図-14) のコルゲートシートの波の山および谷に生ずる曲げ応力を 図-15 に示す。この図によれば垂直荷重に比例して曲げ応力は増加し、荷重 6t においては測定値の平均は 966 kg/cm^2 となる。これは 2. によって行なった計算値の 94% に相当する。なお測点 B および C のゲージについても測定したがほぼ同様な結果であって計算値と測定値とはよく一致した。

図-16 に測点 A のコルゲートシートの波の山および谷において円周方向に生ずる引張および圧縮応力の測定結果を示した。この図によれば引張応力の平均が 723 kg/cm^2 となり、計算値の 98% に相当し、これも非常によく一致している。しかし圧縮応力の平均は 622 kg/cm^2 となり、計算値の 84% に当る。この原因としては 図-3 に示すごとくコルゲートシートの屈曲部における曲率半径 28 mm に対して板の厚さが 2.7 mm あり、

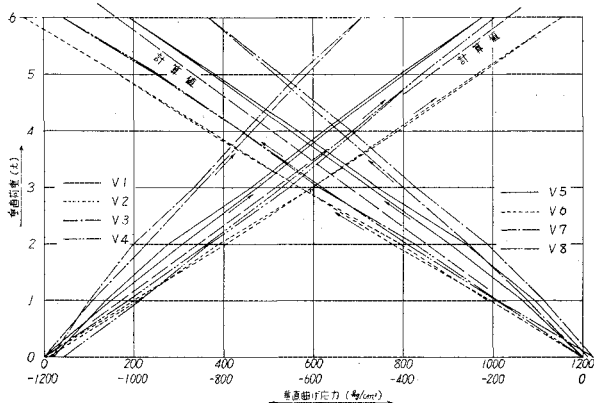


図-15 圧縮試験によるコルゲートシートに生ずる曲げ応力溶接結合、大波貯蔵ビン

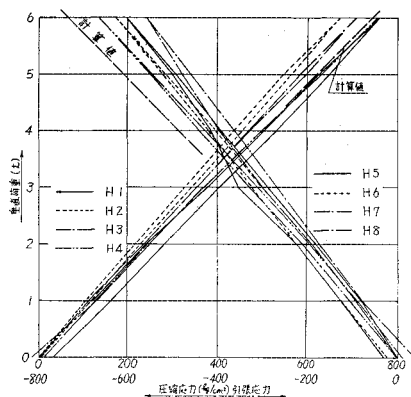


図-16 圧縮試験によるコルゲートシートに生ずる引張および圧縮応力溶接結合、大波貯蔵ビン

板の曲げによって屈曲部の内側に生ずる曲げひずみが外側に生ずる曲げひずみの 10% 程度小さくでたものと考えられる。同様な実験を小波のコルゲートシートを用いて作った貯蔵ビンについても行なったが、計算値と測定値とはほぼ一致することが確かめられた。

6. 骨材排出時における貯蔵ビン内の骨材の流動状況

さきに述べたごとく貯蔵ビンに骨材を填充し、または抜き出すときコルゲートシートに生ずる応力および貯蔵ビンの側面または底面が受ける圧力について多くの測定を行なったが、いずれも底面より骨材を抜き出す当初急激に応力および圧力が変化することが認められた。この原因を解明する一つの方法として貯蔵ビンより骨材を抜く過程において貯蔵ビン内の骨材の流動状況を調べた。

写真-2 に示すごとく砂利または砂を貯蔵ビンに填充するとき 30 cm の厚さごとに標識および番号をつけた砂利を放射状に埋め込んだ。続いて貯蔵ビンの底面より少量ずつ骨材を抜き出し、流れ出る骨材の中から標

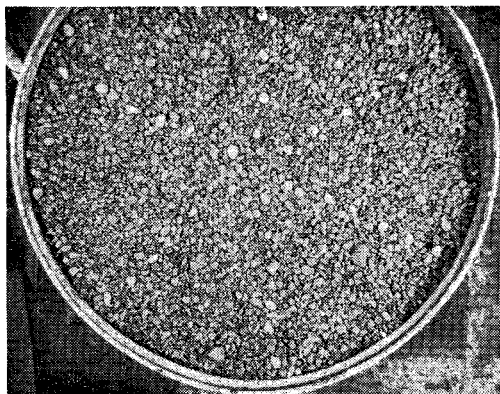


写真-2 標識をつけた砂利を配置した状態 (最上段)

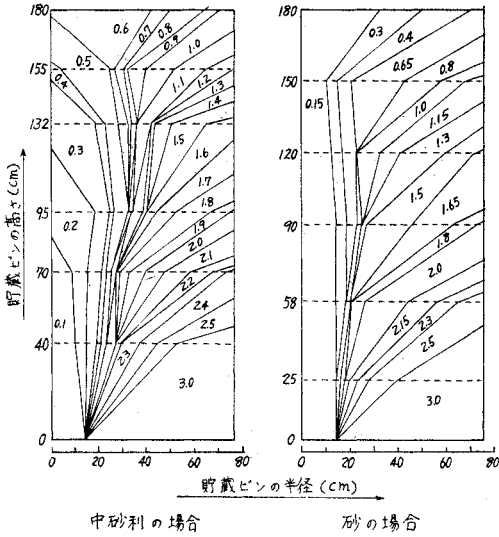


図-17 骨材排出時における貯蔵ビン内の骨材の流動状況

識のついた砂利を拾い出し、その番号とそれまでに排出された骨材の量を記録した。このようにして貯蔵ビン内の骨材の抜け出す順序を知ることができた。

図-17 に大波 コルゲートシートによる貯蔵ビン内の中砂利および砂の流動状況を示す。図の横軸は貯蔵ビン中心からの距離を示す。したがってグラフの左辺は貯蔵ビンの中心軸である。図中に示された多数の折線は砂利または砂の排出された順序を示し、また折線の間記入した数字は折線に達するまでに排出された骨材の量を m^3 で示したものである。この図によれば中砂利の場合にはまず排出口の直上が直径約 30 cm の管状に抜け、この直径は上になるほど次第に太くなり、砂利の高さ 90 cm では約 60 cm の径となる。これより上では直径はそのまま砂利層の表面に達する。次にこの管内の砂利に続いて周囲の砂利が上層から順次この流出路に流れ込んで排出されるようである。

砂の場合には貯蔵ビンの中央に直径 30~40 cm の垂

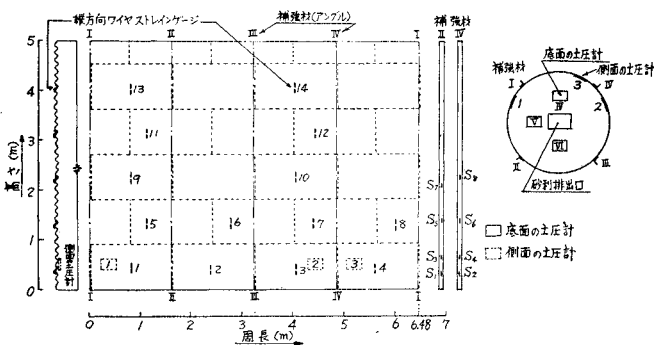


図-18 貯蔵ビンの展開図および平面図

直な管状部分が形成され、この管の直径は上層に達してもほぼ一定である。この管を通して上部から骨材が順次引出されることが判明した。これに似た現象は従来粒状または粉状体の貯蔵ビンまたはサイロについて観察されたことであるが¹⁾、今回の実験によって砂利または砂を填充したコルゲートシート製の貯蔵ビンについても成立することが確かめられた。

以上は砂利または砂の流動の順序を述べたのであるが、いずれも排出の初期に貯蔵ビンの中央に管状の通路が形成されることを知った。骨材の排出前にはこの管内の骨材の重量は主として底面で負担されていたと考えられるが、骨材が下向に移動を開始するとき管内の骨材とその周辺の骨材との間に動摩擦を生じ、この摩擦力は周辺の骨材内を伝播して周壁に達する。また管状通路周辺の骨材は横方向の圧力が緩和されるため中心に向かっていくらか膨張し、これに伴って上下方向に収縮する。この結果周壁に作用する負担を増すことになると考えられる。これらがともに作用して骨材の排出時に貯蔵ビンの壁に生ずる応力が急に増加する原因になると想像される。

7. 大型貯蔵ビンに対する骨材填充試験

以上は実験室内に設置された直径 1.5 m、高さ 1.9 m の貯蔵ビンに関する測定結果であるが、野外に建造された直径 2 m、高さ 5 m の貯蔵ビンについても同様な実験を行なった。これは決して大型とはいえないが、前の実験と比較する便宜上大型なる名称を付けた。

図-3(b) に示すコルゲートシート 5 枚半が上下に継ぎ合わされ、径 19 mm のボルトで締め付けられている。当初は 4 本のアングル材 (65×65×6) が補強材としてボルトを用いて垂直方向に取付けられていたが、実験の後半にはこれらの補強材を撤去した。図-18 に貯蔵ビンの展開図ならびにワイヤストレッチャーおよび

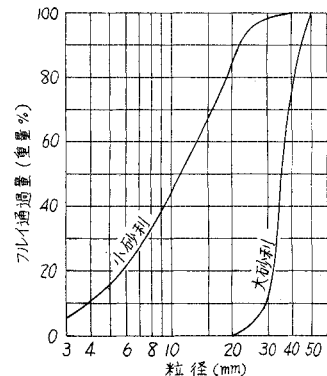


図-19 砂利の粒度曲線

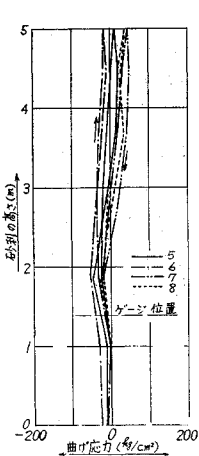


図-20 コルゲートシートに生ずる曲げ応力小砂利(補強材あり)

貯蔵ビンに垂直補強材をつけた場合に底面より1.4mの高さでコルゲートシートに生ずる垂直方向の曲げ応力を測定した結果を図-20に示したが、砂利の高さが増加しても曲げ応力はほとんど生じなかった。砂利を底面より抜き出す際も同様である。この図は小砂利についての測定であるが大砂利の場合にも同様に曲げ応力はほとんど生じなかった。

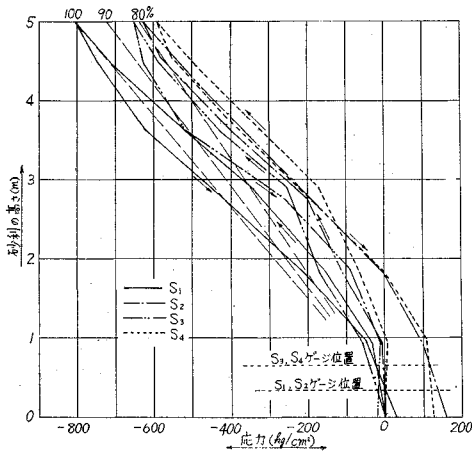


図-21 補強材に生ずる圧縮力、小砂利

次に垂直補強材に生ずる圧縮応力を図-21に示すが、この図によれば砂利の高さにほぼ比例して補強材に生ずる圧縮応力が増加することが認められる。砂利を貯蔵ビンの底面より抜き出すとき補強材が受ける圧縮応力は砂利を充填するときに比べてわずかに大きい値を示している。この図には補強材の荷重負担率を80%、90%、100%と仮定した場合に貯蔵ビン底面より34cmの位置で補強材に生ずる圧縮応力を破線で示したが、砂利を満杯にしたとき、4本の補強材が受ける荷重負担率は90%となっている。

土圧計の取付け位置を示した。貯蔵ビンの容量は16m³あり、ベルトコンベヤを使って大砂利または小砂利を充填した。これらの砂利の粒度曲線を図-19に示した。見掛けの比重は小砂利が1.66、大砂利が1.62であり、安息角はともに38°となっていた。測定時間も含め貯蔵ビンを満杯にするのに6時間を要したが、この間の日射および風の影響を防ぐため貯蔵ビン全体をテントで覆って測定を行なった。

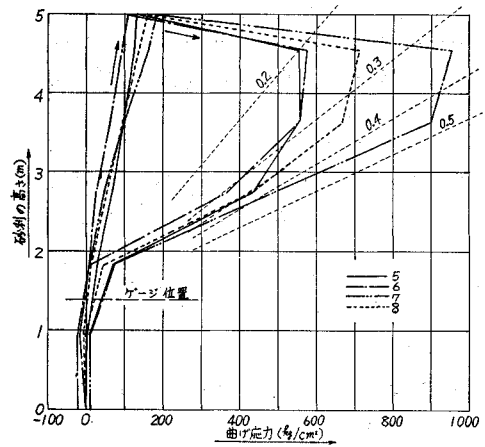


図-22 コルゲートシートに生ずる曲げ応力、小砂利(補強材なし)

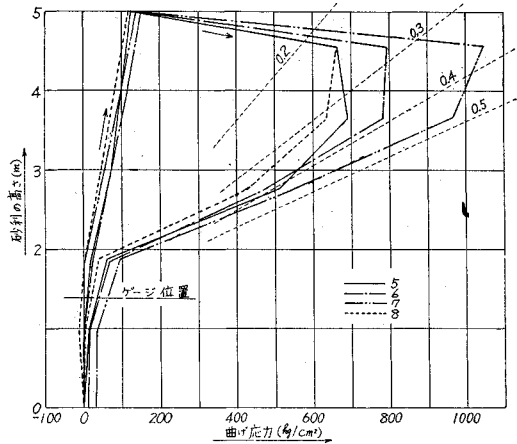


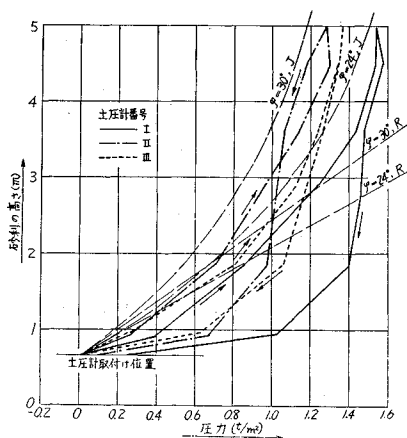
図-23 コルゲートシートに生ずる曲げ応力、大砂利(補強材なし)

図-20, 21に示された測定結果をあわせて考察すれば垂直補強材を取付けた場合には砂利と貯蔵ビンの壁面との摩擦による垂直圧力はコルゲートシートに変形を与えず、有効に補強材に伝達されていることを示している。なお砂利の種類による差は見られなかった。

次に垂直補強材を取りはずした後貯蔵ビンに小砂利または大砂利を充填または引出したときに底面より1.4mの高さでコルゲートシートに生ずる垂直方向の曲げ応力を測定した結果を図-22, 23に示した。これらの図によれば貯蔵ビンに骨材を充填する過程においては、コルゲートシートが受ける垂直方向の曲げ応力は非常に小さいが、骨材を抜き始めると急激に大きくなることが認められる。すなわち小砂利および大砂利の場合ともに骨材を充填して貯蔵ビンが満杯になる5.00mにおいて約140 kg/cm²の垂直曲げ応力しか受けないが、いったん貯蔵ビンの底面より砂利を抜き砂利面の高さが4.55m

のとき測定した結果、小砂利の場合平均 790 kg/cm^2 、大砂利の場合は平均 700 kg/cm^2 の曲げ応力となった。これらの値は砂利を填充する過程における曲げ応力の5倍以上となっている。これは前章で述べたごとく、砂利を底面から抜く始めに急に砂利層が上下方向に収縮してその結果側壁に下方向の摩擦力が作用し、貯蔵ビンが軸方向に圧縮され、コルゲートシートの山や谷に大きな曲げ応力が発生したことを示している。なお両図とも砂利の高さが 1.4 m まで下ったときに曲げ応力がほとんど0となるのはワイヤストレインゲージを貼り付けた高さに相当するためである。

図—22,23 にはゲージを貼り付けた位置より上の砂利の重量の 20%, 30%, 40%, 50% が貯蔵ビンの側壁によって支持されると仮定した場合にコルゲートシートの山に生ずる見掛上の曲げ応力を点線で示したが、砂利を填充する過程においては砂利の重量のわずかに 4% 程度が側壁によって支持されるのに対し、砂利を引き出す過程においては砂利の重量の30~45%が側壁によって支持されたことを示している。これらの数値は小型貯蔵ビンで測定して得た数値に比べていくらか小さい。このような差を生じた原因としては図—4 に示すごとく大型貯蔵ビンの剛度は小型貯蔵ビンの剛度に劣る上に断面積が大きいため荷重の負担能力が低下するためと考えられる。



図—24 貯蔵ビン側面に生ずる圧力、小砂利
(補強材あり)

次に貯蔵ビンの底面より 65 cm の高さに取り付けられた土圧計によって砂利を填充するときおよび引き抜くときに壁の受ける土圧を測定した結果を図—24 に示した。この図は垂直補強材をつけ小砂利を使用した場合の側圧を示したが、砂利の高さが増すとともに側圧も増加するが、砂利の高さが約 2 m すなわちおおむね貯蔵ビンの直径を越えるとその後の増加が比較的少なくなることが認められる。また砂利を抜くときには当初の変化は少

なく、砂利の高さが約 2 m より低下したとき急に圧力が下がる傾向を示した。したがって同一の砂利の高さで比較すれば砂利を抜くときには填充するときよりいくらか大きな側圧を示した。

測定値を比較するために図—24 にはランキン土圧論およびヤンセン式で貯蔵ビン側面が受ける土圧を計算した結果を破線で記入した。砂利の内部摩擦角を 30° と仮定した場合と 24° と仮定した場合を示したが、ランキン土圧論によれば圧力は砂利の深さに比例し、ヤンセン式によれば深さが増すにしたがって土圧の増加割合は小さくなり、土圧は一定値に近づくはずである。この図に示すごとく摩擦角を 24° と 30° の中間に仮定してヤンセン式を用いた場合が測定値に最も近くなる。

9. 結 論

一般にコルゲートシートで作った貯蔵ビンは垂直方向のたわみ性が大きいため中に填充した材料の重量を周辺の壁で負担する割合は比較的少ない。直径 1.5 m の貯蔵ビンで最大 40% となる場合があり、直径が大きくなればさらに小さくなる。しかしコルゲートシートに垂直方向の補強材を添接するときにはコルゲートシートのたわみ性が束縛され、中に填充した材料のたわみ性が優るのでこの重量の 90% までを補強材が負担する場合があった。この場合にコルゲートシートは荷重を補強材に伝達するだけでほとんど荷重を負担していない。

貯蔵ビンの底に排出口を設けるのが通例であり、この口を開いて中の材料を取出すときには材料が下方に移動するためコルゲートシートのたわみ性が大きいことは無関係に材料が沈下を開始するときに急に壁に作用する負担が増大し、直径 1.5 m の貯蔵ビンでは材料の重量の 50% に達する場合があった。

以上をあわせて考察すれば貯蔵ビンに補強材を添接する場合には中に填充した材料の重量の 90% 以上を周辺の壁を通じて補強材に伝達されるとして設計する必要がある。

補強材のない場合には材料の重量の何%を壁が負担するかは貯蔵ビンの直径および壁の剛度によって異なり、直径の大きいほど小さくなるが、小型の貯蔵ビンでも 50% を壁が負担すると見なして設計をすればよいと考えられる。垂直補強材は大型の貯蔵ビンにおいて骨材投入時または地震のときに生ずる偏圧に対抗するために必要とされているが、小型の貯蔵ビンにおいて偏圧のおそれのない場合には垂直荷重によってコルゲートシートに生ずる曲げ応力は円周方向の引張または圧縮応力の発生によって軽減されるため垂直補強材を不要とする場合が多数あると考えられる。

貯蔵ビンの底には 填充材料の重量の $3/4$ が作用する
場合があり、側圧はこの $1/3 \sim 1/2$ となる。この側圧に
よって貯蔵ビンには円周方向の張力が作用するのである
が、コルゲートシートの波の曲げに伴って生ずる引張応
力はこれよりはるかに大きくなることに注意する必要が
ある。

従来貯蔵ビンに関して多数行なわれた研究¹⁾ によれば
貯蔵ビンの中に填充された粒状または粉状体を底から抜
き出すときに粒状体の流れに 2 種類あることが観察され
た。第 1 類は中央部に煙突状の通路ができてこの中を通
り上層部から 順次排出される 場合 (funnel-flow) であ
り、第 2 類は底の排出口を開くと同時に貯蔵ビンの内容
全部が 同時に下方方向に 移動する場合 (mass-flow) であ
る。mass-flow においては移動時に急に側圧が増加する
ことが認められ、コンクリート製のサイロにきれつを生
じたのはこのような流動状態のときであるといわれてい
る。しかしながら funnel-flow においては当初流動する
のは煙突内の部分に限られ、その他は動かないため側圧
の増加は比較的少ないとされている。今回コルゲート
シートによって作られた貯蔵ビンについて砂利および砂
の流動の状態を観察したところ funnel-flow によるこ
とが判明した。側壁に作用する土圧を測定した結果にお

いても材料の流動の初期に急に側圧の増加することは認
められず、ほぼヤンセンの土圧論が適用されることが判
明した。ただしこの際砂利の内部摩擦角を安息角の 70%
程度に仮定する必要がある。

以上に述べたごとく貯蔵ビンの構造強度より見た場合
には funnel-flow は有利であるが、このときには貯蔵ビ
ンの底部周辺に堆積した材料は最後でないと 排出され
ず、材料の分離または変質を生ずるとかその他の理由で
不都合とされる 場合もある。よって mass-flow を期待
するため側壁の内面摩擦を小とし、かつ底をろうと状に
する場合もあるが²⁾、コンクリート用骨材に対しては摩
擦係数が大きいためその効果はほとんど期待することは
できない。

参 考 文 献

- 1) Alexander M. Turitzin: Dynamic Pressure of Granular Material in Deep Bins. Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 89, No. ST 2, April, 1963.
- 2) A.W. Jenike: "Steady Gravity Flow of Frictional Cohesive Solids in Converging Channels", Journal of Applied Mechanics, Vol. 31, Series E, March 1964, pp. 5-11.

(1971.6.7・受付)