

むつ小川原石油備蓄基地における RC リングの 水張試験時挙動

STUDY FOR BEHAVIOR OF RC-RING IN WATER TEST AT MUTSU-OGAWARA OIL STORAGE BASE

吉澤 耿介*・大森 弘一**

By Kosuke YOSHIZAWA and Koichi OMORI

In this paper, three issues were examined based on the various measurements observed at Mutsu-Ogawara Oil Storage Base.

- (1) Stresses in RC-ring measured during water test.
Testing season affects the stress generated in RC-ring during water test.
- (2) The relationship between the settlement of tank shell and the settlement of RC-ring.
A certain correlation exists between them.
- (3) The relationship between the settlement and planar deformation of tank shell.
Elastic deformation of the shell subjected to the settlement of itself, causes planar deformation of tank shell.

Keywords: tank, reinforced concrete ring, measurement, water test

1. はじめに

わが国初の石油国家備蓄基地であるむつ小川原石油備蓄基地(図-1)は, S. 54. 10 に当該地に立地決定された後, S. 55. 4 より公称容量 11 万 kl タンク ($D=81.5$ m, $H=24$ m, 液深 21.6 m) 51 基を主とする貯蔵施設等の工事に着手し, S. 58. 8 に一部のタンクへ待望の原油が貯蔵され, すべての施設は S. 60. 9 に完成した。

当基地では, タンク基礎の主要部である鉄筋コンクリート(以下 RC と表示)リングの挙動把握を目的としてタンク 51 基のうち No. 29 および No. 47 タンクにおいて, 基礎構築段階よりタンクの水張試験完了時点まで, No. 29 タンクで 22 か月, No. 47 タンクで 19 か月の長期間にわたり計測を実施した。この間 RC リングの挙動に関する各種の貴重なデータを集積することができた。計測仕様・方法等の概要, 主に水張試験前の計測結果に基づいた RC リングの挙動・発生応力に与える温度変化の影響検討についてはすでに報告^{1), 2)}したが, 今回は現地で実施した砕石リング材料の一面せん断試験

結果, 荷重の大きさからいって RC リングの発生応力に最も影響を与えると考えられている水張試験時の RC リングの発生応力計測結果, タンク側板沈下と RC リング沈下との関係およびタンク側板沈下とタンク側板の

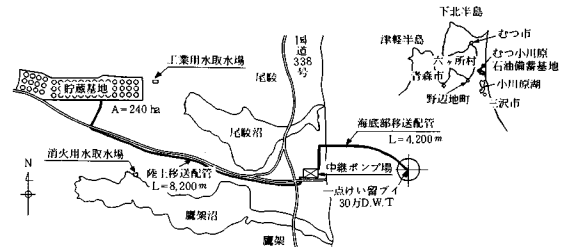


図-1 むつ小川原石油備蓄基地全体配置図

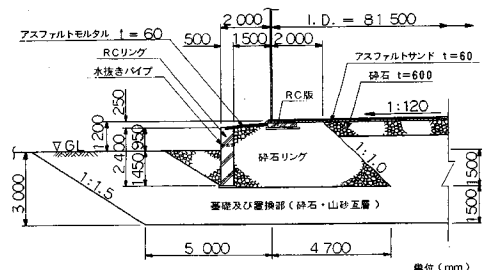


図-2 RC リング基礎図

* 正会員 工修 清水建設(株)土木本部設計部設計課長
(〒108 港区三田3-13-16 43森ビル)

** 正会員 東亜燃料工業(株)機械技術部建設担当部長
(〒100 千代田区一ツ橋1-1-1 バレスサイドビル)

平面的な変形との関係について報告するものである。なお、当基地のタンク基礎は図-2に示すとおり、基礎を直接、地盤の上に築造するタイプで、GL-2.0~4.0 mの深さを良質土で置換し、RCリングおよび碎石リン

グで補強した盛土基礎となっている。

2. 計測概要

(1) 計測仕様

No. 29 タンクの RC リングの計測は図-3に示す3測点で実施した。各測点における計測器の配置も同図に示した。これらの計器はすべて差動トランス型で、温度補償されていることおよび所要の精度を確保していることを事前に性能検査して確認し、設置した。なお、No. 29 タンクの RC リング計測の主な目的は、RC リングに発生する応力を把握することとしたため、外力となる土圧の計測は1測点でしか行わなかった。

一方、No. 47 タンクの RC リングの計測は、RC リングへの外力となる土圧（タンク荷重による側圧を含む）が、どの程度になるかを把握することを主目的として計測仕様を決定した。No. 47 タンクの測点平面位置および各測点の計測器配置を図-4に示す。なお土圧の計測は、荷重計により載荷板（ $B=1.0\text{ m}$ 、 $h=2.4\text{ m}$ ）に作用する全土圧を鉛直土圧、水平土圧に分離して土圧力として計測できるように工夫した特別なものである。また、受働土圧側では鉛直上向きの土圧が大きくなった場合を考え、鉛直土圧用荷重計と合わせて引張鉄筋計も設置し、鉛直土圧力が計測できるようにした。さらに、No. 47 タンクでは、変位計を用いて水張試験時のタンク側板と RC リングとの相対変位および RC リングの変位を計測し、タンク挙動を把握できるように土圧計測の3測点に設置した。

(2) 計測方法

No. 29 タンクの RC リングの計測は現地ヤード内に観測小屋を設置し、そこでパソコンにより制御しながら毎日午前11時にすべて自動計測し、データは鉄筋計・コンクリートひずみ計は応力度に、土圧計は強度に換算し、フロッピーディスクに保存した。一方、No. 47 タンクでは各計測器の読み取りは、各計測器のコードを3台の手動切換器に集め、そこでハンディタイプの測定器に内蔵されているカセットテープに集録し、事務所に設置したパソコンと連結してフロッピーディスクに保存した。

(3) 碎石リング材料の一面せん断試験

現在、碎石リング用碎石は、平板載荷試験値 [5 mm 沈下時における試験値 (K_{50})] が $K_{50} \geq 20\text{ kg/cm}^2$ であることという条件で締固めについて規定³⁾されており、土圧等を算定するための強度定数は明らかになっていない。RC リングの鉄筋、コンクリートの発生応力および作用土圧を計測するにあたり、これらに影響を与える碎石の強度定数を把握する目的で、現場において碎石の一面せん断試験を実施した。せん断試験機のタイプは上部

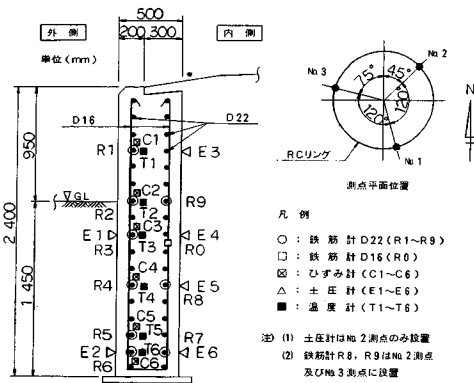


図-3 No. 29 タンク計測器配置図

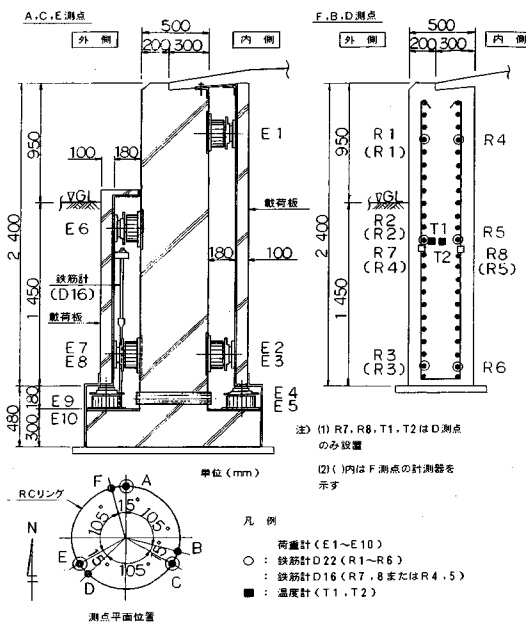


図-4 No. 47 タンク計測器配置図

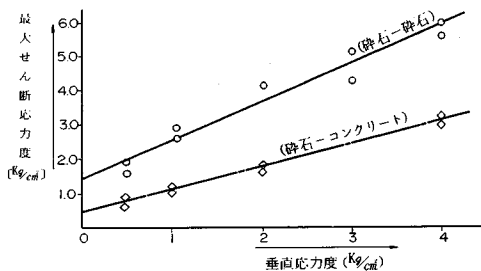


図-5 一面せん断試験結果

せん断箱固定下部可動型で、形状は一边50cmの正方形で、C型鋼で補強した $t=12\text{ mm}$ の鉄板で作成し、深さは上下とも15cmで下部せん断箱はコロ($\phi 19$ 丸鋼)の上をせん断方向に移動できるようにした。試験方法は垂直応力を一定に保ちながら、せん断荷重を油圧ジャッキにより徐々に増加させ、各せん断荷重に対する水平、垂直変位を測定した。試験としては碎石そのものの強度定数を得るために碎石と碎石、碎石とRCリングとの壁面摩擦力を得るために碎石とコンクリートの2種類の一面せん断試験を行った。試験結果を図-5に示す。碎石~碎石の $c=1.4\text{ kg/cm}^2$ 、 $\phi=48^\circ$ 、碎石~コンクリートの $c=0.4\text{ kg/cm}^2$ 、 $\phi=34^\circ$ であった。現在はこの値を設計で直接用いることはないが、より合理的な設計法が確立される際の参考になるものと思われる。また、 K_{30} 値と強度定数 c 、 ϕ との関係は現状では明確でなく、今後ともデータを蓄積していきたい。

3. 計測結果

No.29タンクのRCリングで実施した鉄筋応力、コンクリート応力、土圧強度および温度の計測結果を水張試験直前を原点として整理し、図-6~図-8に示す。

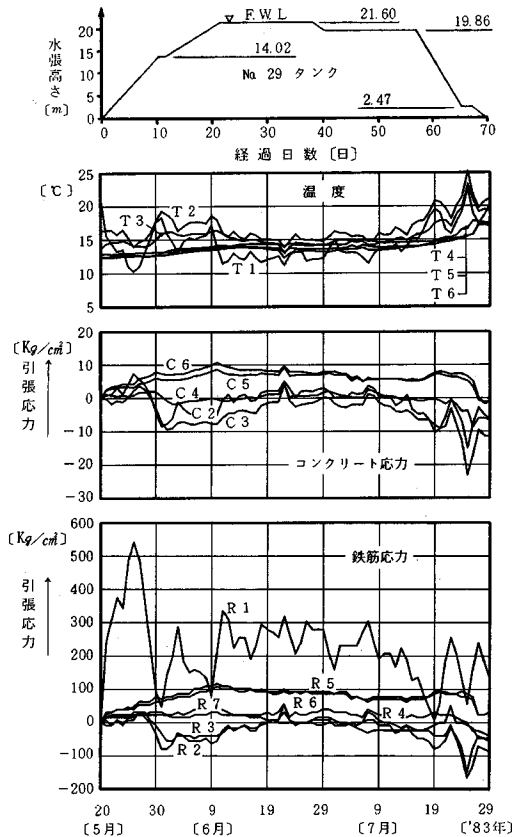


図-6 No.1 測点計測結果図 (No.29 タンク)

ただし、コンクリート応力のうち、発生応力がコンクリートの引張耐力まで上がってしまったものは、この値が絶対値ではないために図から削除してある。同様に、No.47タンクのRCリング計測結果のうち水張試験直前を原点として整理した鉄筋応力、温度について図-9に示す。また、RCリングの計測と並行して実施した、タンク側板およびRCリングの沈下測定の結果を沈下展開図として、No.29タンクのを図-10に、No.47タンクのを図-11に示す。なお、その他の計測結果については別の機会にゆずることにしてここでは省略した。

(1) 鉄筋応力の挙動

基礎盛土開始から水張試験開始前までのRCリングの計測により、温度の季節変化に連動する形で鉄筋の発生応力が周期的に変化する傾向がみられ、挙動としては気温の下がる冬季に引張応力が大きくなり、逆に気温の上がる夏季には引張応力が減少する計測結果となり、相

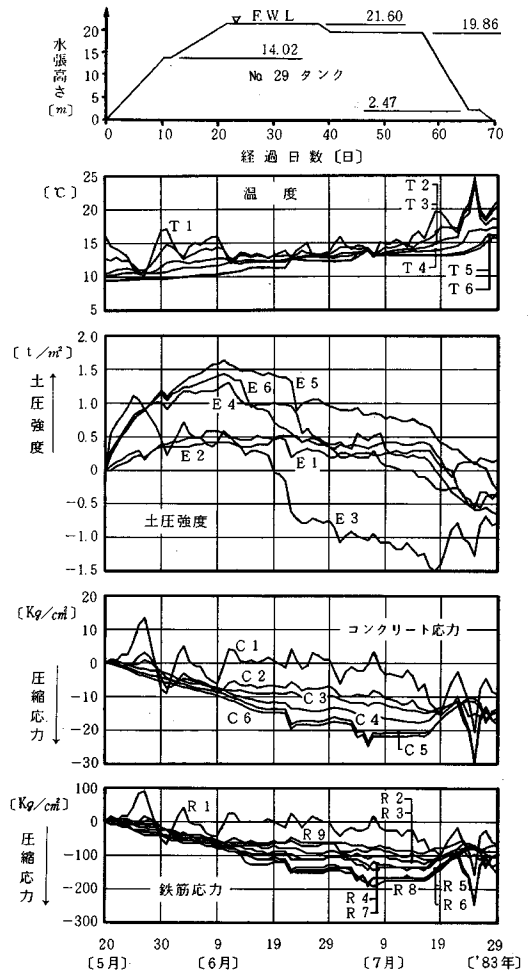
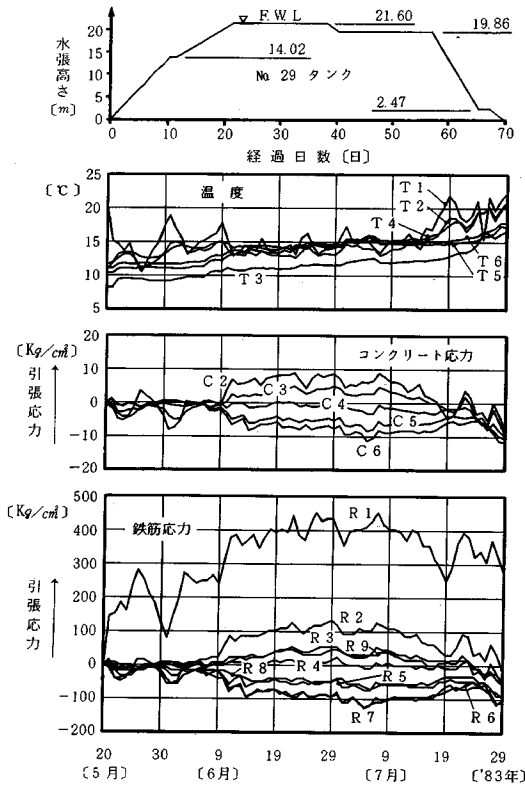
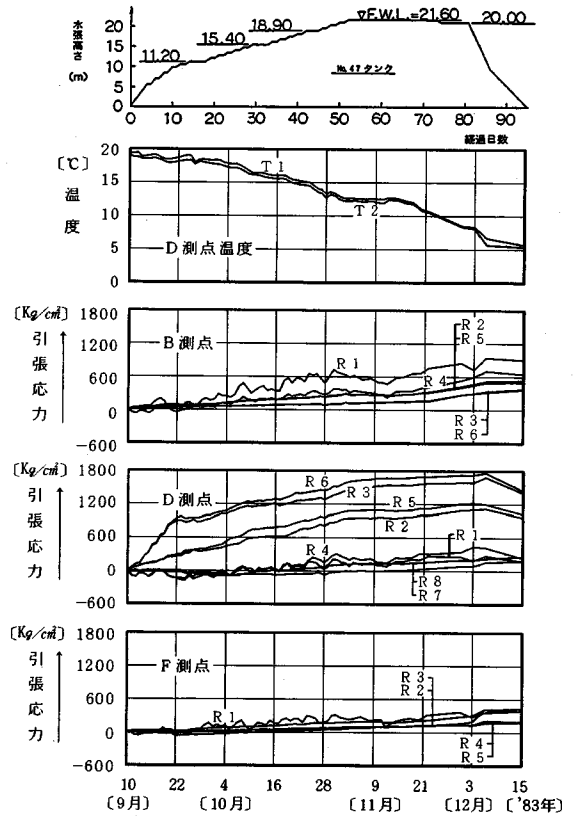


図-7 No.2 測点計測結果図 (No.29 タンク)



図—8 No. 3 測点計測結果図 (No. 29 タンク)



図—9 鉄筋応力計測結果図 (No. 47 タンク)

関・回帰分析の結果、温度変化と鉄筋応力の変化との間には高い相関関係があることが確認された²⁾。この鉄筋応力の挙動は両タンクの RC リングともに同様であった。計測結果によると年間の RC リングの温度変化は大きいところで 23°C あり、これに対応する鉄筋応力はクラックの入っていない測定点で約 500 kg/cm² 増減しており、温度変化の影響による発生応力を除いた応力、すなわち基礎盛土による発生応力は、約 100 kg/cm² であることがわかった。また、この間の計測により、タンク自重は RC リングの発生応力には、ほとんど影響していないことがわかった。

水張試験時についても、図—6～図—8 と図—9 の鉄筋応力の発生状況を比較すると明らかなように、温度変化の影響が著しい。すなわち、No. 29 タンクの RC リングでは、水張荷重が 21.6 t/m² と大きいにもかかわらず、鉄筋の発生応力は水張試験が夏に向かう温度上昇期のため、水張荷重による引張応力の増加は、温度上昇に伴う引張応力の減少とで打ち消される形となり、見掛上小さく、ヘアークラックが入っている測定点でも、引張応力の増加は 550 kg/cm² しかなく、大部分は 100 kg/cm² 以下の引張応力の増加であった。これに対して、No. 47 タンクの RC リングの発生応力は、水張試験が秋から

冬にかけての温度下降期に実施されたため、温度降下に伴う引張応力の増加と水張荷重 21.6 t/m² による引張応力の増加とが相乗される形となり、各測定点とも引張応力は大きくなって、許容応力度に近い発生応力の増加となった測定点もあった。No. 47 タンク RC リングの 3 測点を比較すると明らかなごとく、D 測点と B、F 測点とは発生応力状況が異なっており、D 測点では図—11 の沈下状況からわかるとおり、B、F 測点と比べて沈下が大きく、RC リングに縦曲げ変形が生じ、それに伴う応力が加算されて鉄筋応力が大きくなっていることがわかる。ただし、No. 29 タンク RC リングの No. 1 測点も No. 2、3 測点と比べて沈下大きい (図—10 参照) にもかかわらず、No. 47 タンク RC リングの D 測点のような応力発生傾向はみられず、一概に沈下が大きければ発生応力が大きいということではなく、一般にいわれているように、そのポイント近辺の RC リングの沈下形状が発生応力に寄与していることが確認できた。

(2) コンクリート応力の挙動

基礎盛土開始から水張試験前までの RC リングの計測により、コンクリートの発生応力も鉄筋応力と同様に、季節による温度変化で、夏季は引張応力が減少し、冬季

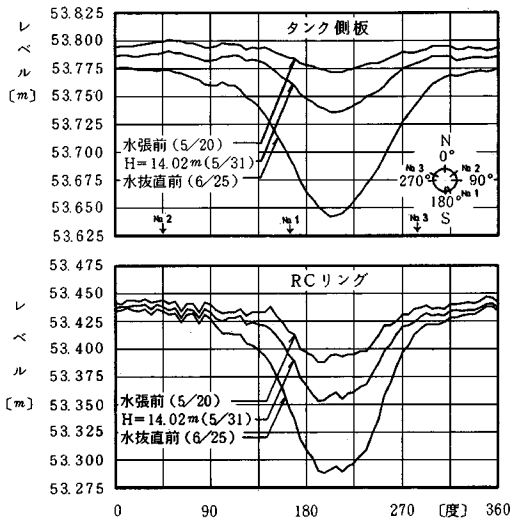


図-10 No. 29 タンク側板・リング沈下展開図

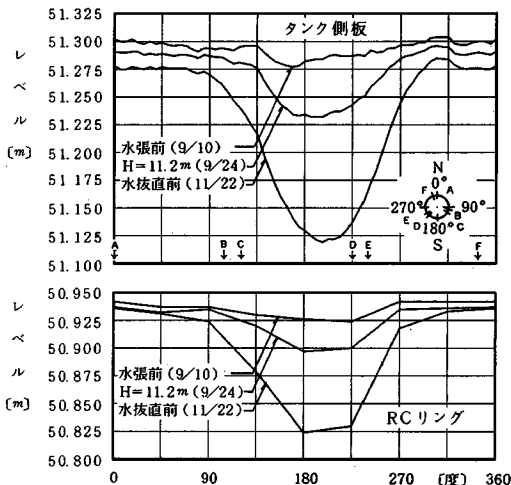


図-11 No. 47 タンク側板・リング沈下展開図

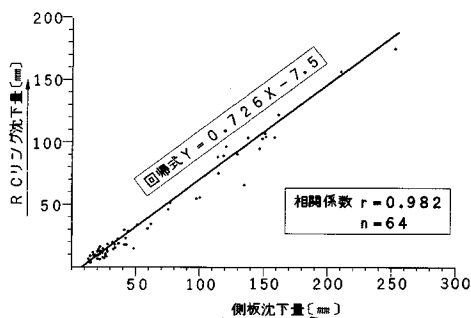


図-12 タンク側板沈下～RCリング沈下の相関関係

は引張応力が増加するという周期性が計測され、挙動としては全く鉄筋応力と同一であった。この間の計測結果によるとコンクリートにひびわれが入ったと判断される

引張応力としては $\sigma_{tt} = 30 \text{ kg/cm}^2 \sim 45 \text{ kg/cm}^2$ で、一般にいわれているコンクリートの圧縮強度 ($\sigma_{365} = 362 \text{ kg/cm}^2$) の $1/10 \sim 1/13$ と合致していた。また、水張試験時におけるコンクリート応力の挙動も水張試験時の鉄筋応力に全く追従する形で同様の挙動を示した。

(3) タンク側板沈下と RC リング沈下との関係

図-10、図-11 からわかるようにタンク側板沈下と RC リング沈下との間には沈下形状に相似性があり、一定の比率関係が成り立つようにみえる。当基地では、51 基の全タンクにおいて水張試験時におけるタンク側板の沈下量、RC リングの沈下量を計測した。それらの中で基礎地盤の床付面に、洪積堆の火山灰層(ローム)が一部存在し、ある程度の沈下が発生した 8 基のタンクにおいて、タンク側板沈下と RC リング沈下のデータが対となっている各タンク 8 点、計 64 点のデータを用い、タンク側板沈下量と RC リング沈下量との関係について相関・回帰分析を実施した。その結果、図-12 に示す回帰式が得られ、両者の間には一定の比率関係があることがわかった。当然ながら、この関係は基礎・地盤条件、タンク側板からの RC リングの距離の大小等により、その比率は変わるものと思われるが、一定の比率関係があるということは、今後のタンクやリングの挙動解明に役立つものと考えられる。

4. タンク側板沈下とタンクの変形との関係

屋外タンクに対するタンク側板の不等沈下量は、現在、設計においては $D/300$ (D : タンク直径) 以下に押さえるようにしている。これはタンクの使用性(機能性)を考え、今まで建設されたタンクでの実績をもとに決められている。1000 kL 以上の特定タンクの屋根構造は浮き屋根式が多く、タンク側壁(板)と浮き屋根との間は、

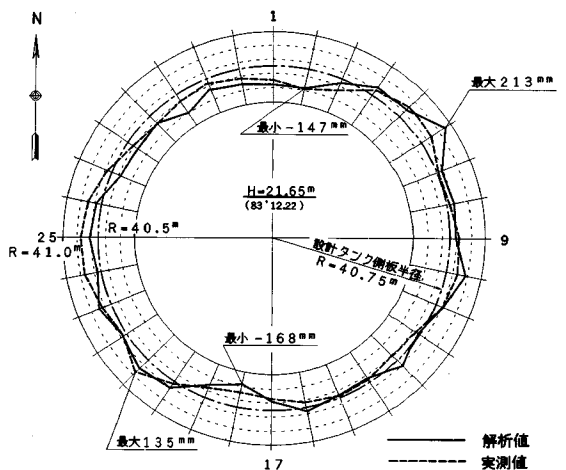


図-13 タンク側板沈下に伴うタンク側板の変形解析結果

通常、シール機構で密着される構造となっている。したがってタンク側板が大きく変形すると、シール機構が追従できなくなって隙間ができたり、逆にシール機構が圧縮され過ぎて、屋根が油面の上下に伴って上下しにくくなってしまい、タンクの機能上問題となってくる。既往の研究でタンク側板が不等沈下によりどの程度変形するかを推定する関係式が提案されている⁴⁾。1基のタンクにおいて、水張試験時に計測したタンク側板の沈下量から、この推定式を用いて、タンク側板の垂直度の変化量、シール間隙（浮き屋根とタンク側板との間隙）の変化量を求め、それぞれの実測値と比較し照査してみた。その結果、垂直度の変化量の推定値～実測値の相関係数は0.6694 ($n=32$)、シール間隙の変化量の推定値～実測値の相関係数は0.6556 ($n=32$)となり、あまり高い相関係数のある結果が得られなかった。そこで、次に、三次元FEM弾性解析を試みた。タンク側板の各ポイントの沈下量をタンク側板下端に強制変形として入力し、浮き屋根高さ位置 ($H=21.65$ m) でのタンクの平面的な変形を求め、水張開始直前を原点（真円）とした実測値（相対値）とどの程度一致するのか検討した。その結果、図-13に示すように、タンク側板の変形をFEM解析によりよく再現（実測値と解析値との相関係数0.8058）できることがわかり、タンク側板の平面的変形が側板の沈下に伴う弾性変形によっていることが確認できた。なお、当然ながらタンク側板の全沈下量のうち、均等な沈下成分は側板の変形に何ら寄与しておらず、相関係数の差は簡易的手法との解析精度による結果と考えられる。

5. まとめ

今回の計測により以下のことがわかった。

(1) RCリングに作用する土圧の大きさに影響する K_{30} 値が $K_{30} \geq 20$ kg/cm³になるように締め固められている砕石リング用の砕石の現地一面せん断試験の結果、砕石の強度定数として $c=1.4$ kg/cm²、 $\phi=48^\circ$ 、砕石とコンクリートの付着力 $c=0.4$ kg/cm²、摩擦角 $\phi=34^\circ$ が得られた。

(2) RCリングの鉄筋、コンクリートの発生応力は季節の温度変化に大きく左右され、温度上昇期（冬→春→夏）に水張試験を実施すると、発生応力は水張荷重による引張応力の増加と温度上昇による引張応力の減少が打ち消す結果となり、今回のNo.29タンクではクラックの入っている部分の鉄筋応力でも最大550 kg/cm²、クラックの入っていない箇所では100 kg/cm²以下程度

の引張応力の増加しか生じなかった。

(3) 温度降下期（夏→秋→冬）に水張試験を実施すると鉄筋の発生応力（コンクリート応力は計測していない）は水張荷重による引張応力の増加と温度降下による引張応力の増加とが加算される結果となり、今回のNo.47タンクでは、鉄筋の許容応力度に近い発生応力が生じたものもあった。

(4) RCリングの沈下による鉄筋、コンクリートの発生応力の大小は、単なるRCリングの沈下量の大小ではなく、対象ポイント近辺のRCリングの沈下形状が影響している。

(5) タンク側板沈下とRCリング沈下との間には一定の比率関係があり、今回の場合、“RCリング沈下量=0.726×(タンク側板沈下量)-7.5 [mm]”という回帰式が得られた。

(6) タンク側板の平面的な変形はタンク側板の沈下に伴う弾性変形により生じている。

6. おわりに

水張試験時のタンク、RCリングの挙動計測により、タンクを含めたタンク基礎の挙動解明の手掛かりとなるいくつかの資料を入手することができた。今後、さらにタンク、リング基礎に関する実測データの集積や研究が進められ、より合理的設計法、規準が確立されることを期待したい。

最後に本計測の計画段階から終始暖かいご意見、ご指導を頂いた東京理科大学 福岡正巳教授、計測の実施にご尽力頂いたむつ小川原石油備蓄（株）建設課および清水建設（株）むつ小川原建設所の丸山敏男氏、報告をまとめるにあたりご指導を頂いた北海道大学 三田地利之教授および解析を手伝っていただいた鈴木 健氏、その他関係各位に対して深謝の意を表する次第です。

参考文献

- 1) 吉澤・大森：むつ小川原石油備蓄基地におけるRCリングの実挙動に関する検討，土木学会論文集VI，1988年3月。
- 2) 吉澤・大森：RCリング（タンク基礎）に与える温度の影響，土木学会論文集VI，1988年3月。
- 3) 危険物技術委員会編：屋外タンク貯蔵所基礎の規制基準（杭基礎およびリング基礎について）解説，技報堂出版。
- 4) Koczwara, F. A. : Simple method calculates tank shell distortion, Hydrocarbon Processing, August 1980. (1988.7.5・受付)