

地中連続壁を本体利用した液化石油ガス用地下式貯槽 の設計と実測との比較

THE COMPARISON BETWEEN DESIGN ANALYSIS AND OBSERVED VALUE ON AN IN-
GROUND STORAGE TANK COMPOSED OF SLURRY WALL AS A STRUCTURAL MEMBER

中澤 亨* 後藤貞雄**

By Akira Nakazawa and Sadao Gotoh

The High-strength slurry wall was used for the construction of an LPG inground storage tank. During excavation of this tank, this slurry wall functioned as a retaining and cutoff wall which resisted the outer water and earth pressure. And in the tank operation, this slurry wall is used as a permanent structural member of the side wall. In this paper, the new design concept, the in-site observation values and the result of fundamental laboratory test on this slurry wall are described.

1 はじめに

東京ガス(株)袖ヶ浦工場に建設された低温液化石油ガス(LPG)地下式貯槽(容量 60,000Kl)には、新工法である本体組み込み高強度地中連続壁が採用された。

側壁は、地中連続壁を先打ちコンクリートとして、一旦山留め荷重を受けた後に、その内側に、順巻工法により後打ちコンクリートを打ち足し、一体構造とした円筒殻を形成する構造とした。

屋根(鋼製)および底板も、側壁円筒殻に結合され、全体を一体の構造とした。

本文は、側壁部円筒殻の合成構造に注目し、本体組み込み高強度地中連続壁の設計の考え方を述べ、設計の予測値と完成後の動態観測結果について比較した。

2 地下貯槽の構造概要

(1) 土質概要

本貯槽建設地は、東京湾の南東沿岸部にあたり、埋め立てにより形成された地区に位置している。この地盤の概要は、上層10m程度までは埋め立て層であるが、それ以深は全体に洪積層で、地表面下約30mに難透水層がある。地中連続壁を遮水壁として難透水層まで構築することにより、内部への地下水の流入を押さえている。

* 部長 清水建設(株)土木本部 (〒104 東京都中央区京橋2-16-1)

** 副部長 東京ガス(株)生産技術部 (〒105 東京都港区海岸1-5-20)

(2) 基本仕様

構造概要を図-1に、基本仕様を次に示す。

・容 量	60,000KL (内径64m×液深18.7m)	・貯 蔵 物	L P G (液化石油ガス)
・L P Gの物性	設計密度 0.50~0.59 t/m ³ 設計温度 -45℃	・設計地震力	基 盤 150 gal 地表面 300 gal

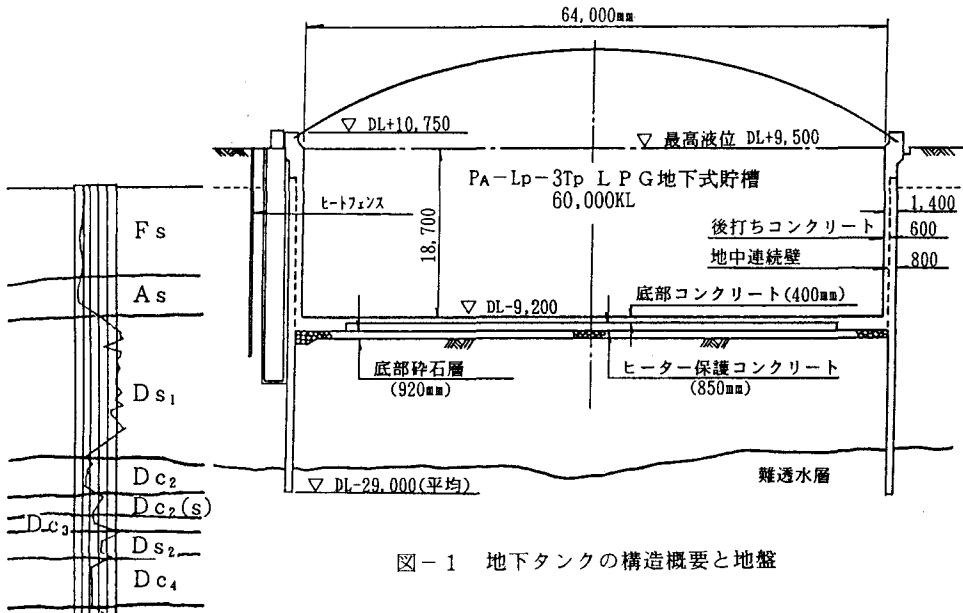


図-1 地下タンクの構造概要と地盤

(3) 設計上の特徴

本貯槽における設計上の特徴を上げると、①地中連続壁を側壁本体に組み込んだ、②側壁と底版を剛結合とした、③高強度コンクリートを使用した、ことである。以下に各々の特徴について説明する。

1) 地中連続壁の本体壁利用

従来、地下式貯槽における地中連続壁は仮設山留として利用されていたが²⁾、本貯槽では、側壁の地中連続壁部は、後打ちコンクリートと一体化し、貯槽完成後に本体壁として利用した。また、根入れ部は、永久遮水壁として利用した。地中連続壁を本体壁利用する場合の設計上のポイントは、次の点である。

・地中連続壁の継ぎ手

地中連続壁部は、新たに開発した剛継ぎ手構造を採用している³⁾。この構造は、面外曲げ、面外せん断及び面内せん断に対して、継ぎ手部と一般部とが同等の耐力を有するものである(図-2)。

・側壁組み込み部の一体化

地中連続壁には、貯槽内部掘削時の山留として発生する応力が貯槽完成後残留するため、側壁の設計は地中連続壁の施工中残留応力を考慮した。構造的には、後打ちコンクリートと地中連続壁の一体化は、凹凸の目荒らしを行い、かつ結合筋を配置することにより対処した(図-3)。

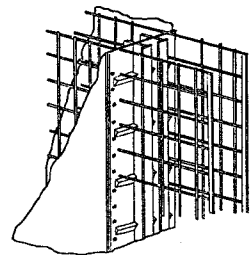
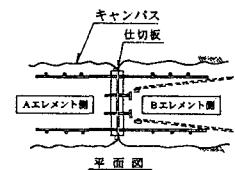


図-2 剛継ぎ手構造

2) 側壁と底版の剛結合

従来の地下式貯槽では、側壁と底版はすべてピン結合であるが⁴⁾、本貯槽では、側壁と底版との目地部に於ける変位を無くし、内装に対してスムーズに結合するため、地下式貯槽として初めて剛結合を採用している。剛結合の場合、底版の鉄筋を地中連続壁に定着するために、結合部の地中連続壁の鉄筋量は多くなっている。

3) 高強度コンクリートの使用

本貯槽の地中連続壁には、施工時の土圧、水圧だけでなく、貯槽完成後のLPGの冷熱による温度荷重及び地震力等が作用する。従って、コンクリートの発生応力度が大きいためコンクリートの設計基準強度 f_{ck} は 360Kg/cm^2 （材令91日）と高強度コンクリートを採用している。従来、泥水中に打設されるコンクリートの設計基準強度は、最大でも 300Kg/cm^2 程度である¹²⁾。

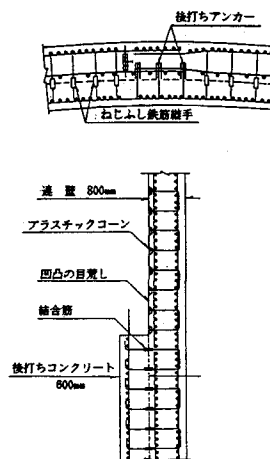


図-3 合成壁の結合構造

3 設計の考え方

(1) 断面力の算定法

断面力の算定は、掘削順序を考慮して地盤の弾性バネ支持の軸対称シェルとして、施工時は施工時のモデルで、完成後は完成後のモデルで、それぞれFEM解析により求める⁵⁾。施工時山留めの安定に対しては、掘削内側の抵抗バネに弾塑性を考慮した。断面力算定時の断面剛性については、全断面有効と考え、施工時は地中連続壁のみの剛性とし、完成後は完全一体合成の剛性とする。また、温度荷重による断面力算定については、ひび割れ発生による剛性低下を考慮し、剛性残存率の考え方を取り入れた⁶⁾。

(2) 曲げ及び軸力に対する応力の算定法（図-4）

施工時については、解析により求められた断面力にたいし鉄筋コンクリート理論⁷⁾により応力算定を行う。完成後については、応力合成と断面力合成を分けて考える。即ち、

①コンクリートについては、連壁合成版部コンクリートは、一般に施工時残留応力（圧縮応力）を受けている状態で、更に完成後増分応力を受ける。従ってこれらを図-5に示すように応力度で重ね合わせて、完成後の応力度を算定する。ここで、コンクリート応力度は、連壁外面と連壁内面（打ち継ぎ面）の2カ所で、鉄筋コンクリート理論により応力度を算定する。なお、施工時残留応力が引張りの場合は、完成後の増分圧縮応力だけを計算する。

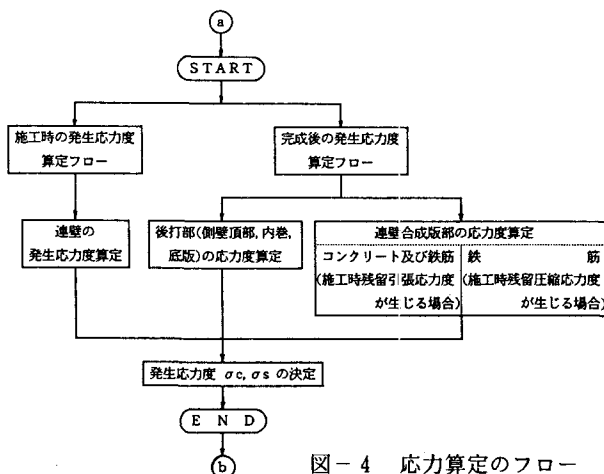


図-4 応力算定のフロー

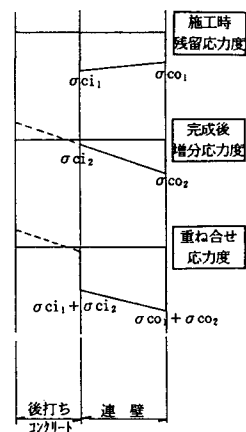


図-5 応力の重ね合わせ（コンクリート）

②鉄筋（施工時残留引張り応力度が生ずる場合）については、地中連続壁鉄筋にたいして施工時残留応力度と完成後増分引張り応力度を重ね合わせる。応力度の算定は鉄筋コンクリート理論により行う（図－6）。

③鉄筋（施工時残留圧縮応力度が生ずる場合）については、完成後増分引張り応力度だけ計算しても良いが、それでは施工時の大きな軸圧縮力が考慮出来ず、鉄筋量も多くなり過大設計となる。そこでこの場合は、施工時荷重も完成後断面に作用させ応力度計算する（図－7）。

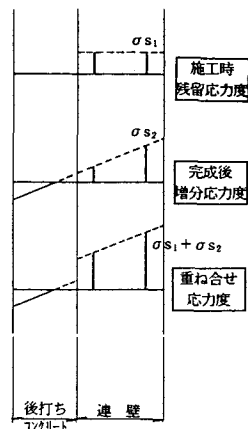
（3）応力の算定法（せん断力に対して）

・面外せん断力に対して、

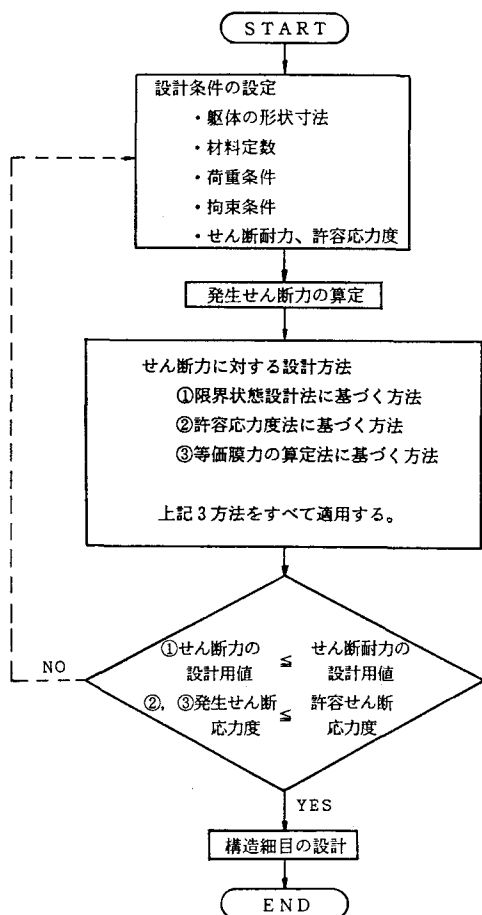
面外せん断力に対しては、発生断面力を合成の後、耐力による照査と、応力度による照査の双方を行う¹⁾（図－8）。

・面内せん断力に対して、

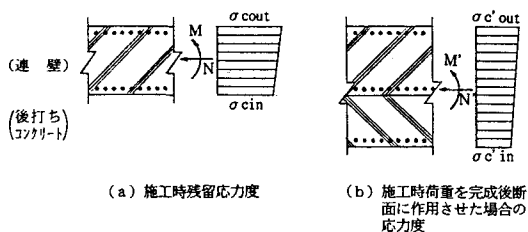
面内せん断力を等価膜力として、軸力に加算して照査する²⁾（図－9）。



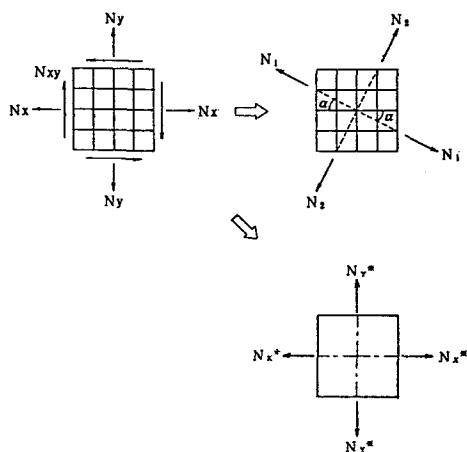
図－6 鉄筋（施工時残留引張り応力度が生ずる場合）



図－8 設計計算の基本フロー（せん断に対して）



図－7 鉄筋（施工時残留圧縮応力度が生ずる場合）



等価膜力 N_x^* , N_y^* は、次式で算定する

$$N_x^* = N_x \pm |N_{xy}|$$

$$N_y^* = N_y \pm |N_{yx}|$$

図－9 等価膜力の算定法

4 基礎実験

貯槽は、構造解析上、軸対称シェルとしてモデル化されているが、そのために、壁体の構造上二つの問題がある。その一つは地中連続壁の垂直継ぎ手の一体性に関してであり、次に地中連続壁に後打ちされたコンクリートとの合成壁としての一体性に関する問題である。その解決策として、双方の問題に対して完全に一体化することを前提に新たな垂直継ぎ手が開発された。その一体性を確認するために種々の基礎実験が実施されている。

(1) 地中連続壁継ぎ手の実験^{9) 10)}

地中連続壁の継ぎ手部分の面外曲げ、面外曲げせん断、面内せん断に対して、性能を確認するために行われた実験である。即ち、面外せん断については、面外せん断機能を有する垂直継ぎ手の形状寸法を決定するために、6種類(図-10)を選定して実験が行われ、その結果、CCIタイプの実験値が最も一体試験体の実験値に近いと報告されている。

面外曲げについては、重ね継ぎ手の重ね長さとし面外曲げ耐力の関係について実験がなされ、その結果、ループ方式(図-11)では35φ以上、ラップ方式では45φ以上必要であることがわかった。面外曲げせん断については、仕切板部の面外曲げせん断耐力を確かめるために実験が行われ、その結果、仕切板を介してコンクリートを打ち継いでも、重ね長さが45φの場合の曲げせん断強度は、一体打ちと同等の強度が得られていると報告されている。

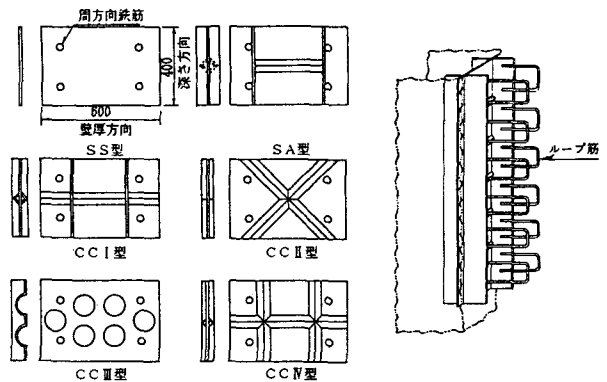


図-10 試験した仕切り板

図-11 ループ方式の重ね継ぎ手

以上の実験から新たに開発された剛継ぎ手構造について次のことが言える。

- ①面外せん断力に対しては、一体構造とほぼ同等に設計出来る。
- ②面外曲げモーメントに対しては一体のものと同等の曲げ耐力を得るためには、重ね長さを、ループ方式で35φ以上、ラップ方式で45φ以上とする必要がある。
- ③面外曲げせん断力にたいしても、重ね長さをループ方式で35φ以上、ラップ方式で45φ以上とすれば一体のものと同等である。

(2) 地中連続壁と後打ちコンクリートとの合成実験^{11) 13)}

せん断耐力については、打ち継ぎ面の目荒し状態、後打ちコンクリートの打設方向、結合鉄筋比の3要因について水準を変えた実験がなされた。¹³⁾ その結果、耐力的には一体ものより小さいが、使用限界内では一体として設計しても充分安全性があると判断できた。

また、曲げ特性については、低温状態においても実験がなされ、その特性が把握されている¹¹⁾(図-12)。

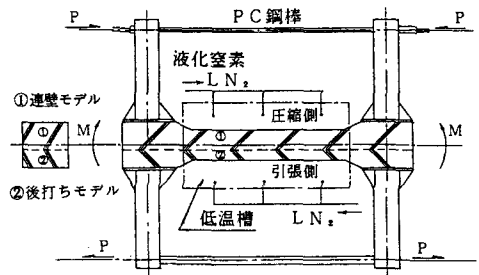


図-12 合成実験の試験体と荷重方法

以上のそれぞれの基礎実験により地中連続壁を本体壁に利用しかつ合成壁として一体構造化可能であることが実証されている。

5 設計計算値と実測値の比較

(1) 概要

実機に取り付けた計器による貯槽稼働1年5ヵ月後の測定結果にもとずき、設計計算値との比較を行った。計器は、側壁部と底版部に鉄筋計を取り付けた。作用荷重の内、貯液による荷重と温度荷重について比較を行った。計測は、底版部についても行っているが、ここでは側壁部について比較する。

(2) 計器の配置

計器の配置は、側壁部については、頂部と合成壁部、底版部については、中央部、周辺部、結合部に配置した。また、温度測定用に、熱電対を鉄筋計位置に設置し、貯槽の温度の計測と鉄筋計の温度補正に使った(図-13)。

(3) 設計計算による予測

・解析モデル

解析モデルを図-14に、計算に用いた定数と剛性残存率を表-1に示す。

・荷重条件

荷重条件は、図-15に分布を、表-2に代表的な組み合わせを示す。温度分布は、別に行った熱伝導解析により求めたものを用いる(図-16)。また、その実測値は良く一致していると報告されている¹⁴⁾。

・応力算定

断面力の算定は、合成後の断面に対する荷重であるから、合成後の断面に対して解析を行う。応力計算は、①全断面有効計算と②鉄筋コンクリート理論による計算の2通りを行い比較の対象とする(図-17)。

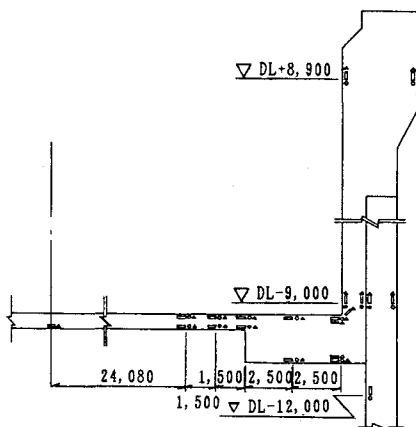


図-13 計器配置

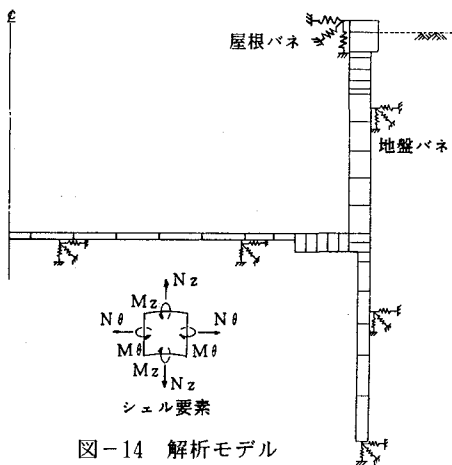


図-14 解析モデル

表-1 設計に用いた定数と剛性残存率

		設計基準強度 $\sigma_{ck}(\text{kg/cm}^2)$	弾性係数 $E_c(\text{kg/cm}^2)$
連 壁	DL+6,000 ~DL-24,500	360	3.3×10^5
	DL-24,500 ~DL-29,000	300	3.0×10^5
内巻コンクリート		240	2.7×10^5
底 版		480	3.9×10^5

$$* (EI)_{\text{CRACK}} = \frac{b \cdot d^2 \cdot k^2 \cdot j \cdot E_c}{2(k + (1-k) \cdot \phi_s)}$$

ここに E_c : コンクリートのヤング係数
 b : 部材の幅
 d : 有効高さ
 k : $\sqrt{2 \cdot p \cdot n + (p \cdot n)^2} - p \cdot n$
 j : $1 - k/3$
 p : 引張鉄筋比 ($= A_s / b \cdot d$)
 n : 鉄筋とコンクリートのヤング係数比
 ϕ_s : $1 - \Delta \sigma_s / \sigma_s$
 σ_s : ひびわれ断面の鉄筋応力度
 $\Delta \sigma_s$: σ_s と鉄筋の平均応力度の差

$$\Delta \sigma_s = \frac{0.18 \cdot \sigma_{ct} \cdot \sigma_{crs}}{p \cdot \sigma_s}$$

$$\sigma_{ct} = 6.0 + 0.06 \cdot \sigma_{ck}$$

$$\sigma_{crs} = \frac{M_c}{p \cdot j \cdot b \cdot d^2}$$

$$M_c = \frac{b \cdot h^2}{6} \cdot \sigma_{ct}$$

表-2 荷重の組み合わせ

ケース	① 液 圧	② ガ ス 圧	③ (温 度土 荷重)	④ 凍 結土 圧
A-1	○	○		
A-2	○	○	○	
A-3	○	○	○	○
A-4			○	

	断面剛性 残存率	備 考
底 版	一般部 0.6	$\alpha = \frac{(EI)_{\text{CRACK}}}{EI}$
	外周部 0.7	
側壁合成版部	0.5	

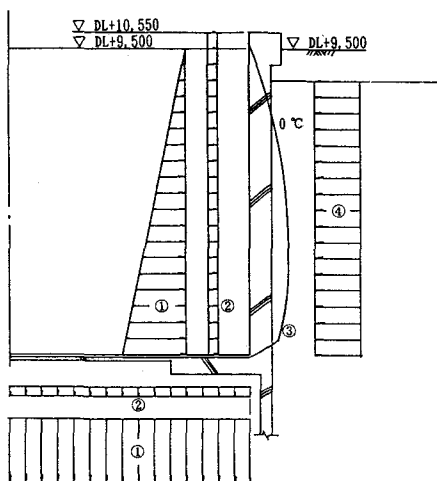


図-15 荷重分布

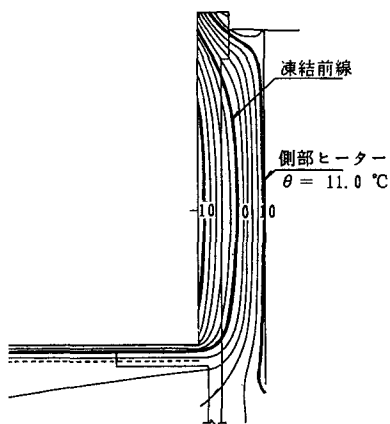
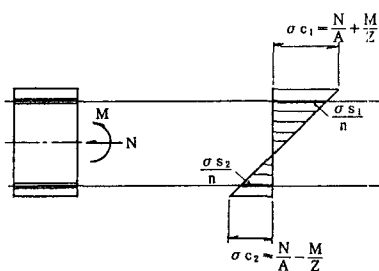
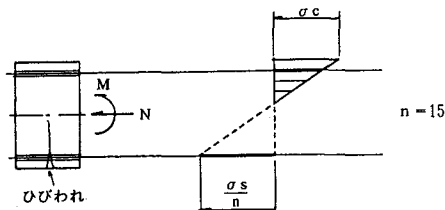


図-16 設計に用いた熱伝導解析結果



①全断面有効計算



②鉄筋コンクリート理論による計算

図-17 2通りの応力算定法

(4) 設計計算値と実測値との比較

図-18, 図-19に設計計算値と実測値との比較を示す。計測の初期値は、貯槽完成後、運転開始時をゼロとした。その結果、

①鉛直方向では、後打ちコンクリート部は全断面有効計算値と実測値は比較的良好な対応を示しているが、地中連続壁部は計算値に対して引張り側の値を示す。

②円周方向では、全断面有効計算値に対して、後打ちコンクリート部では実測値はよく対応するが、地中連続壁部は引張り側の値を示す。

地中連続壁部の応力が設計計算値よりも引張り側の値を示す理由については、温度荷重により躯体が収縮しようとするのに対し、周辺地盤が拘束しているのではないかとと思われる。貯槽の解析モデルの地盤拘束の考えかたと定数の設定に一考が要される。

(5) まとめ

①計測点数が少ないが、今回の測定範囲内では、設計計算値と実測値は、荷重（液圧＋ガス圧＋温度荷重）に対して、比較的良好な対応を示しており、この設計法で構造安全性は確保し得る。

②荷重（液圧＋ガス圧＋温度荷重）に対しては、現時点では発生歪みが低レベルであることも影響して、応力算定は、全断面有効（ただし温度荷重に対しては剛性低下を考慮）とした場合が良く対応する。

③地盤の拘束バネ定数（せん断バネ）は、温度荷重に対して一考を要する。

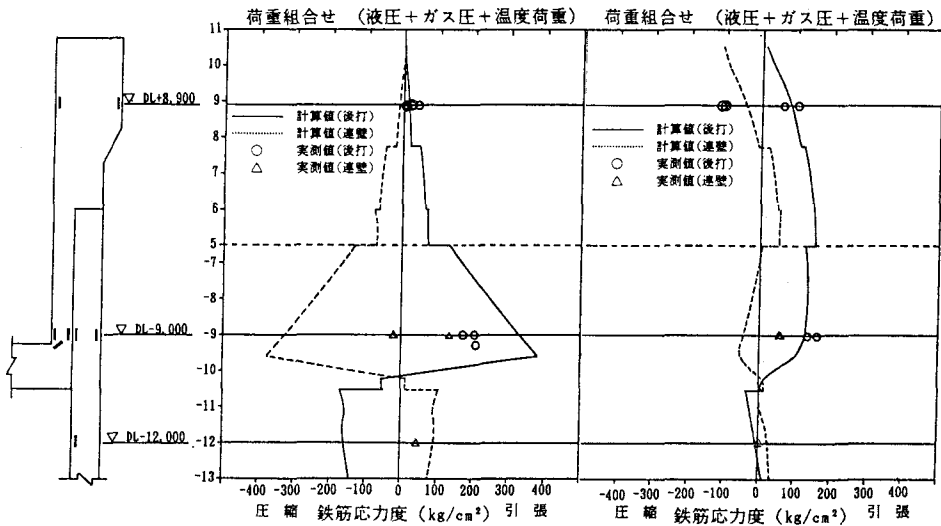


図-18 実測結果(鉛直方向)

図-19 実測結果(円周方向)

6 考察

貯槽構造として地中連続壁を本体壁と一体として組み込んだ構造の設計の考え方とそのための基礎実験について紹介し、合わせて、貯槽稼働後の応力の実測値と計算値を比較した。その結果次の事柄が明確になった。

①地中連続壁と後打ちコンクリートとは一体に合成されるとして設計してよい。

その前提として

- ・地中連続壁の垂直継ぎ手には、剛継ぎ手構造を用いる。
- ・地中連続壁と後打ちコンクリートとの合成は凹凸をつけ結合鉄筋を配置する。
- ・実機の挙動は現状の荷重（液圧＋ガス圧＋温度荷重）では、全断面有効と考えてよい。

②構造の解析モデルは地盤をバネと考えた周辺ばね拘束の円筒殻としてよいが、バネ定数（せん断バネ）については今後研究が必要である。

今後の課題として、

- ①軸圧縮力をうける版の面内せん断力に対する鉄筋コンクリート部材の設計法については等価膜力に換算して軸力に加算する安全側の応力照査を行ったがより合理的な設計法の研究が必要である。
- ②計算値と実測値との比較では側壁に対する測定数が充分ではなく概括的な比較になったが、更に類似の構造物での計測に期待したい。

今後、地中連続壁の有効利用として、ここに発表したものと同型式の地下構造物が、円形大断面大深度掘削の有力な方法として、橋梁基礎や立て坑などに活用されることが期待される。

7 謝辞

本文をまとめるにあって協力戴いた、貯槽建設の関係者並びに設計計測の関係の皆様に謝辞を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：昭和61年度制定コンクリート標準示方書 設計編 pp. 50～55
- 2) 後藤貞雄・井畔瑞人・久保田宗孝：大深度連続地中壁を用いた大型LNG地下式貯槽，土木学会誌，1979年8月号 pp. 10～16
- 3) 後藤貞雄・渋谷政文・中澤 亨・牧野総一：高強度連続地中壁による地下タンクの設計・施工，土木技術，42巻10月号（1987），pp. 95～104
- 4) 山本康博・杉 正：LNG地下タンクの設計法，コンクリート工学，Vol. 19, No. 7, July, 1981 pp. 72～78
- 5) 武川恵之助・井畔瑞人・中澤 亨・池上盛容：LNG地下タンクの耐震設計，土と基礎，29-9, September, 1981
- 6) 青柳征夫・佐藤良一：極低温下におけるRC部材の力学的特性，セメント・コンクリート，No. 394, December, 1979, pp. 18～28
- 7) 例えば、吉田徳次郎：鉄筋コンクリート工学
- 8) 通産省資源エネルギー庁：原子力発電用コンクリート格納容器技術基準（案），昭和54年11月
- 9) 岡田武二・武川芳広：SSS工法に関する実験的研究（その6），清水建設研究所報，第36号，昭和57年10月号，pp. 29～39
- 10) 岡田武二：SSS工法に関する実験的研究（その3），清水建設研究所報，第19号，昭和47年4月号，pp. 83～114
- 11) Y. Sugawara・K. Minegisi :Design of an In-Ground Storage Tank for Refrigerated Propane ,GAS TECH '84 LNG/LPG CONFERENCE
- 12) 中原邦昭・前川行正：東電富津火力発電所建設工事におけるLNG地下式貯槽工事の連続地中壁，1983 7月号，pp. 34～41
- 13) 岡田武二・塩屋俊幸：鉛直打ち継ぎ目のせん断耐力に関する研究，土木学会第33回年次研究発表会，昭和53年9月
- 14) S. Goto・M. Shibuya・T. Nakajima・M. Kuroda : The Comparison between the results of transfer analysis and the observed values on a refrigerated LPG inground tank, 5th International Symposium on Ground Freezing, 1988

（1988年10月12日受付）