

旧法屋外タンク貯蔵所の保安検査のあり方に係る調査検討

中間報告書

平成 24 年 3 月

消防庁危険物保安室

はじめに

昭和49年に岡山県倉敷市において発生した屋外タンク貯蔵所のタンク底部からの重油流出事故を契機に、屋外タンク貯蔵所の技術基準が整備・強化され、一定期間ごとにタンクを開放し、タンク内部を検査する保安検査の制度が創設された。保安検査の時期については、タンクの技術基準に応じて定められた基本開放周期に加え、保安のための措置を講じたものに対しては、開放周期を延長することができる制度が設けられている。最近では、平成21年11月27日に実施された行政刷新会議による「国家備蓄石油管理等委託費」の事業仕分けの結果を踏まえ、連続板厚測定法を用いた検査周期のあり方の検討を行い、昭和52年以降に設置された特定屋外タンク貯蔵所について、新たな保安検査の時期の決定方法を提案することができたところであるが、規制・制度改革に係る対処方針（平成22年6月18日閣議決定）において、昭和52年以前に設置された特定屋外タンク貯蔵所（以下「旧法タンク」という。）を含めた特定屋外タンク貯蔵所全体について保安検査の検査周期のあり方を総合的に検討することとされたものである。

旧法タンクについては、タンクの溶接部の信頼性が劣るものがあること及びタンクの基礎地盤の堅固さについて具体的な基準がなく建設されていることから、腐食による板厚の減少対策のみでは安全性を担保することができないという問題が残っている。旧法タンクの保安検査のあり方に係る検討はその項目が多岐にわたるため、基礎地盤に関する検討、溶接部に関する検討を実施したうえで、総合的に保安検査のあり方について検討することが必要である。

こうしたことから、消防庁危険物保安室が設置した「旧法屋外タンク貯蔵所の保安検査のあり方に係る調査検討会」において、本年度は基礎地盤の堅固さに関する評価手法について調査検討を行ったところである。今回実施した水張試験時における地盤の沈下量測定及び有限要素法を利用した沈下シミュレーション手法については、地盤の持つ工学的性質を確認するために必要な条件等について、いくつかの有益な知見と課題が得られたところである。

調査検討会の委員各位には、ご多忙中にも関わらず、熱心なご議論をいただいた。本報告書がとりまとめられたのは、委員各位の熱意とご協力によるところが大であり、深く感謝申し上げる次第である。

平成24年3月

旧法屋外タンク貯蔵所の保安検査の
あり方に係る調査検討会

座長 亀井 浅道

中間報告書目次

第1章 検討の概要

1.1 検討の背景と目的	1-1
1.2 検討体制	1-2
1.3 検討経過	1-2

第2章 屋外貯蔵タンクからの危険物流出事故について

2.1 底部からの危険物流出事故の分析	2-1
2.2 危険物流出事故が発生したタンクの経年分析	2-1
2.3 底部板溶接部の破断による危険物流出事故事例	2-2
2.4 経年劣化による危険物流出事故の発生プロセス	2-7
2.5 底部板の腐食による危険物流出に対する安全性の確保	2-8

第3章 屋外タンクの技術基準、保安検査の現状と課題

3.1 特定屋外タンク貯蔵所に係る技術基準	3-1
3.2 保安検査	3-1
3.3 底部板破断による危険物流出事故を踏まえた課題	3-4

第4章 側板外周部およびタンク内底板の沈下量の計測

4.1 目的と概要	4-1
4.2 計測した旧法タンクと地盤条件	4-1
4.3 側板外周部およびタンク内底板の沈下量の計測	4-4

第5章 有限要素法を用いた沈下シミュレーション

5.1 屋外貯蔵タンクの基礎地盤沈下に係るFEM解析の方法	5-1
5.2 平板載荷試験のFEM解析	5-7
5.3 水張試験のFEM解析（地盤の沈下シミュレーション）	5-15

第6章 まとめ

6.1 水張試験時の底部鉛直方向変位計測のまとめ	6-1
6.2 FEM解析のまとめ	6-1
6.3 旧法タンクの基礎地盤の堅固さを確認するための課題	6-2
6.4 タンク底板と地盤基礎面の空隙がタンク底板の強度に与える影響について	6-3

第1章 検討の概要

1.1 検討の背景と目的

容量が1万キロリットル以上の液体の危険物を貯蔵する屋外タンク貯蔵所については消防法の規定により、一定期間ごとに市町村長等による保安検査を受けることとされている。平成21年11月27日に行われた行政刷新会議による「国家備蓄石油管理等委託費」の事業仕分けにおいて、消防法におけるタンクの保安検査間隔について、安全性は十分に検証しながら規制緩和の可能性を探ることが求められた。これを受けて平成22年度に「屋外タンク貯蔵所の保安検査の周期に係る調査検討会」を開催し、昭和52年政令第10号の施行後に設置許可の申請がなされた特定屋外貯蔵タンク（以下「新法タンク」という。）に関する保安検査周期を延長した場合の安全性について検討し、保安のための措置が講じられたタンクにおいて連続板厚測定法を活用して得られた1年当たりの板の腐食量と最小板厚に基づいて計算された8年以上15年以下の保安検査周期を定めることができる制度を確立した。また、規制・制度改革に係る対処方針（平成22年6月18日閣議決定）においても、新法タンクの保安検査周期の延長を検討し結論を得るとともに、特定屋外貯蔵タンク全体について保安検査の検査周期のあり方について総合的に検討することとされた。昭和52年以前に設置された特定屋外貯蔵タンク（以下「旧法タンク」という。）については、タンクの溶接部の信頼性が劣るものがあること及びタンクの基礎地盤の堅固さについて具体的な基準がなく建設されていることから、腐食による板厚の減少対策のみでは安全性を担保することができないという問題が残っている。旧法タンクの保安検査のあり方に関する検討はその項目が多岐にわたるため、基礎地盤に関する検討、溶接部に関する検討を実施したうえで、総合的に保安検査のあり方について検討する必要がある。

このような状況を踏まえ、本検討会では基礎地盤に関する事項について検討を行うものである。

1.2 検討体制

旧法屋外タンク貯蔵所の保安検査のあり方に係る調査検討会（五十音順）

座長	亀井 浅道	元横浜国立大学	特任教授
委員	大谷 英雄	横浜国立大学大学院環境情報工学研究院	教授
	国松 直	独立行政法人産業技術総合研究所	地圏資源環境研究部門 主任研究員
	越谷 成一	川崎市消防局 予防部	危険物課長
	龍岡 文夫	東京理科大学 理工学部土木工学科	教授
	龍川 恒	社団法人石油化学工業協会	
	田中 敏	社団法人日本建設業連合会	安全部 参事
	西浦 教之	堺市消防局 予防部	指導課長
	村上 沢	石油連盟	
	森 修一	倉敷市消防局	副参事兼危険物保安課長事務取扱
	八木 高志	危険物保安技術協会	土木審査部 上席調査役
	山田 實	消防庁消防大学校消防研究センター	研究統括官
事務局	鈴木 康幸	消防庁危険物保安室	室長
	永友 義夫	消防庁危険物保安室	課長補佐
	宮内 孝	消防庁危険物保安室	パイプライン係長
	宮本 紳利	消防庁危険物保安室	総務事務官

1.3 検討経過

第1回検討会 平成23年9月13日

第2回検討会 平成24年2月10日

第3回検討会 平成24年3月7日

1.2 検討体制

旧法屋外タンク貯蔵所の保安検査のあり方に係る調査検討会（五十音順）

座長	亀井 浅道	元横浜国立大学	特任教授
委員	大谷 英雄	横浜国立大学大学院環境情報工学研究院	教授
	国松 直	独立行政法人産業技術総合研究所	地圏資源環境研究部門 主任研究員
	越谷 成一	川崎市消防局	予防部 危険物課長
	龍岡 文夫	東京理科大学	理工学部土木工学科 教授
	龍川 恒	社団法人石油化学工業協会	
	田中 敏	社団法人日本建設業連合会	安全部 参事
	西浦 教之	堺市消防局	予防部 指導課長
	村上 沢	石油連盟	
	森 修一	倉敷市消防局	副参事兼危険物保安課長事務取扱
	八木 高志	危険物保安技術協会	土木審査部 上席調査役
	山田 實	消防庁消防大学校消防研究センター	研究統括官
事務局	鈴木 康幸	消防庁危険物保安室長	
	永友 義夫	消防庁危険物保安室課長補佐	
	宮内 孝	消防庁危険物保安室パイプライン係長	
	宮本 紳利	消防庁危険物保安室総務事務官	

1.3 検討経過

第1回検討会 平成23年9月13日

第2回検討会 平成24年2月10日

第3回検討会 平成24年3月7日

第2章 屋外貯蔵タンクからの危険物流出事故について

消防庁が全国の消防機関を通じて調査を行っている「危険物に係る事故事例」や消防庁消防大学校消防研究センターによる地震被害の調査報告書を基に、1974年（昭和49年）から2009年（平成21年）までの間に発生した屋外貯蔵タンクにおけるタンク底部及び側板からの危険物流出事故の概要を表2.1（通常時の事故）及び表2.2（地震時の事故）に列挙するとともに、事故の傾向について分析した。

2.1 底部からの危険物流出事故の分析

通常時の屋外貯蔵タンクにおけるタンク底部及び側板からの危険物流出事故（対象：153件）について分析した結果を図2.1に示す。対象とした全タンクについて、底部からの危険物流出事故に着目して整理すると、底部の腐食によるものが53%、き裂によるものが10%を占める結果となった。内部開放検査や保安検査において底部の板厚及び溶接部の検査が義務付けられている特定屋外貯蔵タンクを対象を限定すると（対象：55件）、底部の腐食によるものが40%、き裂によるものが11%を占めている。底部の腐食による危険物流出事故は大きな割合を占めるものの、特定屋外貯蔵タンクでは開放時の板厚確認が一定の効果を果たしているものと考えられる。一方、底部のき裂による危険物流出事故は特定屋外貯蔵タンクにおいてもその割合が減少していないことから、き裂に対する安全性については慎重に検討する必要がある。

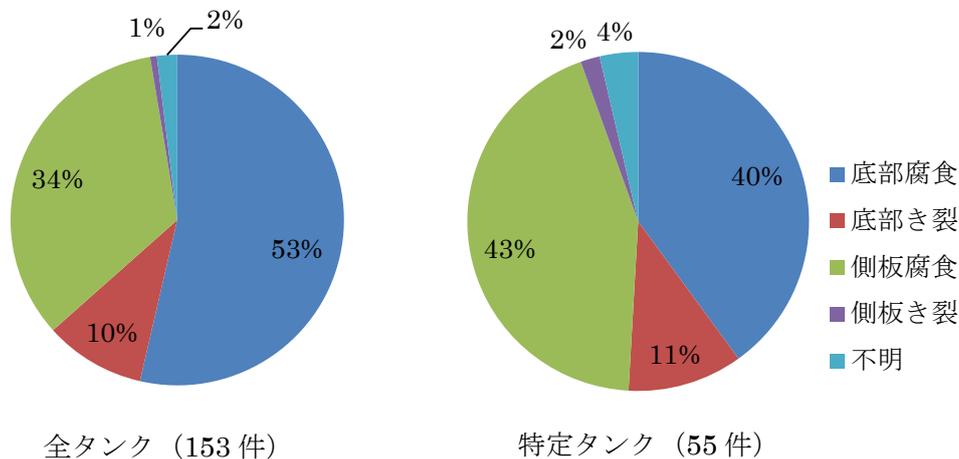


図 2.1 危険物流出事故の発生部位

2.2 危険物流出事故が発生したタンクの経年分析

通常時の屋外貯蔵タンクにおけるタンク底部及び側板からの危険物流出事故について、タンクの設置から事故発生までの経過年数別に整理したものを図2.2に示す。1974年から2009年までに発生した危険物流出事故153件について分析した結果は、必ずしも経年が進

んだタンクに危険物流出事故が多いわけではないが、2000年以降に発生した危険物流出事故49件について分析した結果は、設置からの経年が30年を超えるタンクが8割を占めることが分かった。経年劣化が危険物流出事故に及ぼす影響は顕著であるといえる。

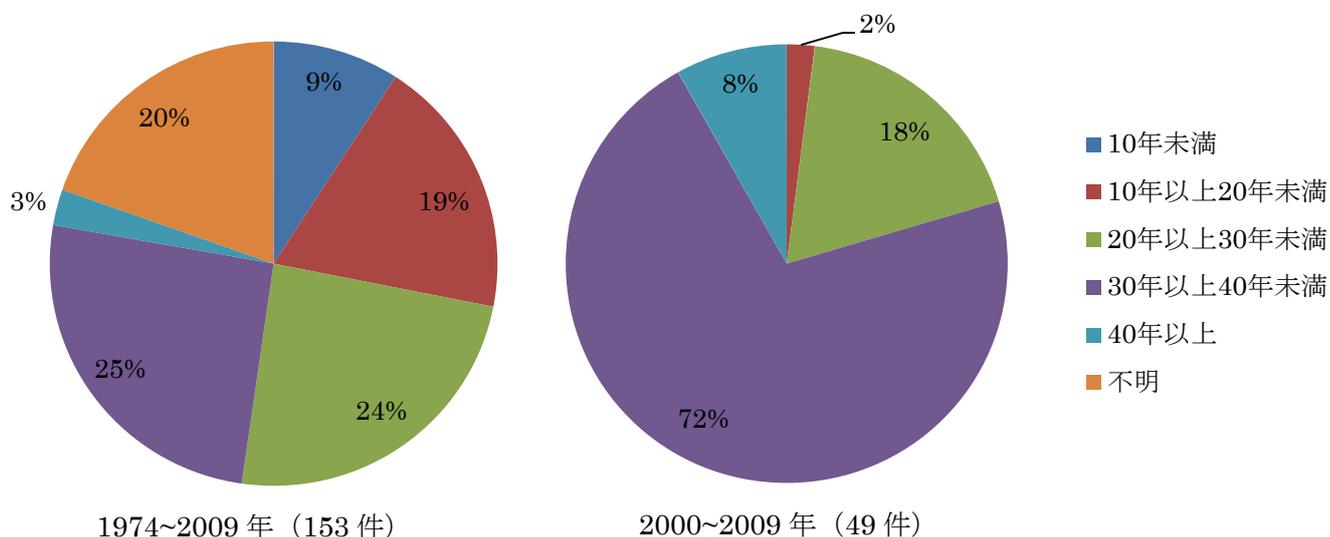


図 2.2 危険物流出事故発生時のタンク経年

2.3 底部板溶接部の破断による危険物流出事故事例

過去の主要な底部き裂からの危険物流出事故の3事例と、最近発生した底部き裂からの危険物流出事故2事例について、事故原因報告書等から得られた事故の情報を以下にまとめる。

(1) 不等沈下による溶接部の割れ (図 2.3 参照)

①事故概要

岡山県倉敷市の製油所内のタンクにおいて、基礎の不等沈下を誘因として側板とアニュラ板を接合する溶接部が破断し、重油 42,888 キロリットルが流出、そのうち 7,500 キロリットルから 9,500 キロリットルが海上へ流出し、瀬戸内海の約 3分の1 を汚染した。

②発生日時 1974年12月18日 20時40分ごろ

③タンク概要

- ・形式 固定屋根式
- ・寸法 直径 52.307m×高さ 23.67m
- ・容量 48,000 キロリットル
- ・内容物 重油
- ・アニュラ板：材質 HW50 板厚 12mm 底板；材質 SS41 板厚 9mm

④事故原因

側板に近いアニュラ板と地盤に隙間が形成され、側板とアニュラ板を接合する溶接部の部分的割れが生じたことにより、溶接部が破断し危険物が流出した。

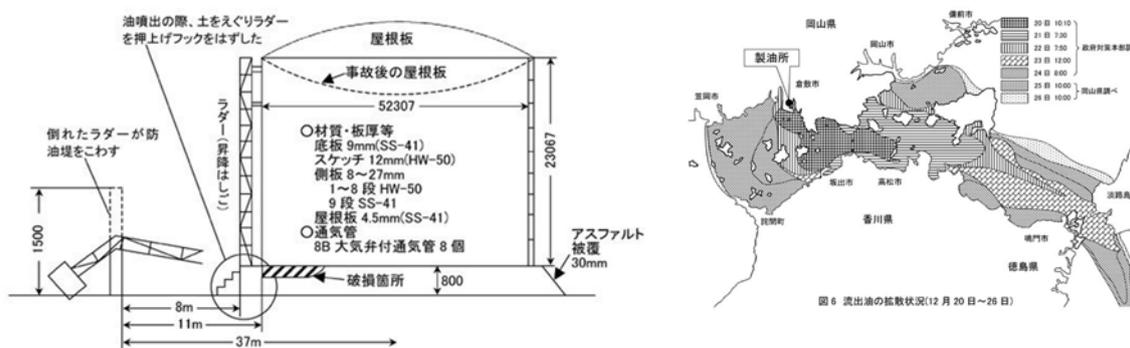


図 2.3 倉敷市におけるタンク事故概略

(2) 腐食減肉したアニュラ部の溶接部の地震による割れ (図 2.4 参照)

①事故概要

昭和 53 年宮城県沖地震により、宮城県仙台市の製油所の 3 基のタンクにおいて、側板とアニュラ板とを接合する溶接部分が破断し、貯蔵中の危険物 68,100 キロリットル (3 基分) が、タンク周囲に設置されている防油堤を超え、また、防油堤下の地盤を洗掘して流出し、製油所構内に流出した。うち、2,900 ないし 5,000 キロリットルが海上へ流出した。

②発生日時 1978 年 6 月 12 日 17 時 14 分 (地震発生)

③タンク概要 (ア : T-217、イ : T-218、ウ : T-224)

- ・形式 固定屋根式 (ア、イ、ウ)
- ・寸法 直径 43.588m×高さ 21.855m (ア、イ)
直径 37.776m×高さ 21.855m (ウ)
- ・容量 31,500 キロリットル (ア、イ)
23,700 キロリットル (ウ)
- ・内容物 C 重油 (ア、イ)
減圧軽油 (ウ)

④事故原因

宮城県沖地震により、タンクはかなり大きな地震動を受けたと考えられる。また、アニュラ板裏面全面に腐食が見られた。このような要因により、溶接部の貫通割れ、不貫通割れが伝播し互いにつながり破断したものと考えられる。

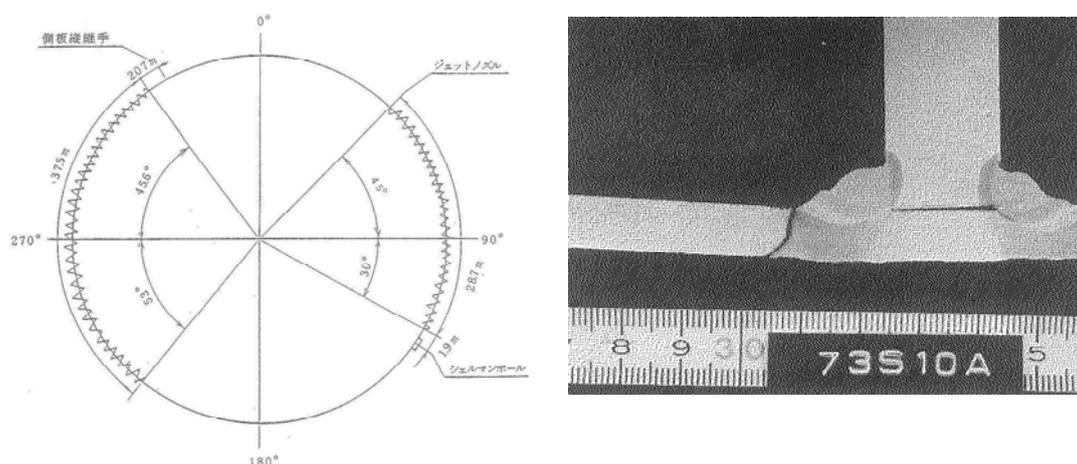


図 2.4 宮城県沖地震によるタンク事故概略

(3) 局部沈下及び溶接部内部の欠陥の相乗効果による割れ (図 2.5 参照)

①事故概要

横浜市内の製油所のタンクで底板相互の重ね継手溶接部が破断し、原油が排水溝に 50 キロリットル流出した。

②発生日時 1979年2月4日 12時30分ごろ

③タンク概要

- ・形式 浮き屋根式
- ・寸法 直径 69.765m×高さ 15.29m
- ・容量 50,000 キロリットル
- ・内容物 原油
- ・アニュラ板：材質 HT60 板厚 12mm 底板；材質 SS41 板厚 8mm

④事故原因

基礎の局部沈下、溶着金属の腐食及び溶接部内部の欠陥の相乗効果によって底板相互溶接部の重ね継手が破断したものの。

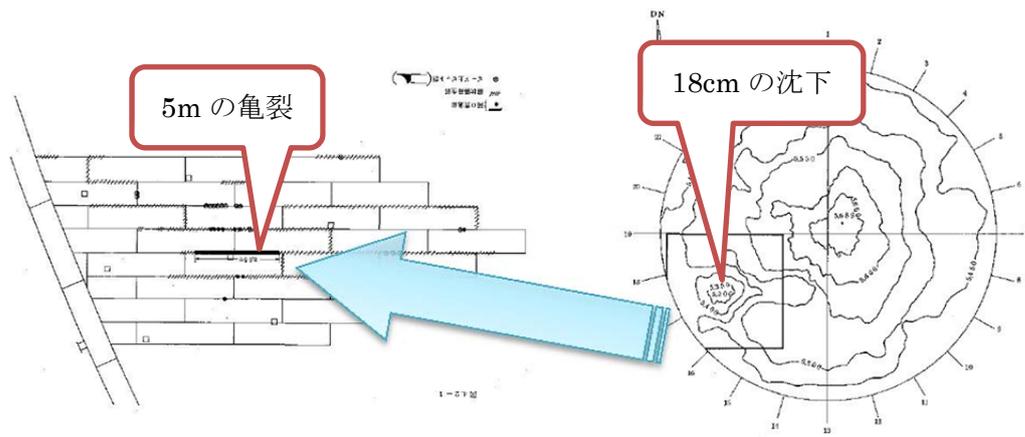


図 2.5 基礎の局部沈下と溶接内在欠陥の相乗効果による溶接破断部概略

(4) 低サイクル疲労による底部板溶接部の割れ (図 2.6 参照)

①事故概要

千葉県市原市の製油所の旧法新基準適合タンクの底部板溶接部が割れ、ジェット燃料が流出したもの。流出量は 0.14 キロリットルと算定されている。

②発生日時 2010 年 1 月 24 日 16 時 50 分ごろ
(直近の保安検査から約 5 か月後)

③タンク概要

- ・形式 浮き屋根式
- ・寸法 直径 67.37m×高さ 18.24m
- ・容量 51,252 キロリットル
- ・内容物 ジェット燃料
- ・アニュラ板：材質 SM50C 板厚 15mm 底板；材質 SS41 板厚 6mm

④事故原因

タンクを開放して危険物流出箇所を特定したところ、ルーフサポート用当板近傍のタンク底板の重ね溶接の溶接線に長さ約 350mm のコーティング及び底板の割れが発見された。低サイクル疲労による割れと事業所では推定している。

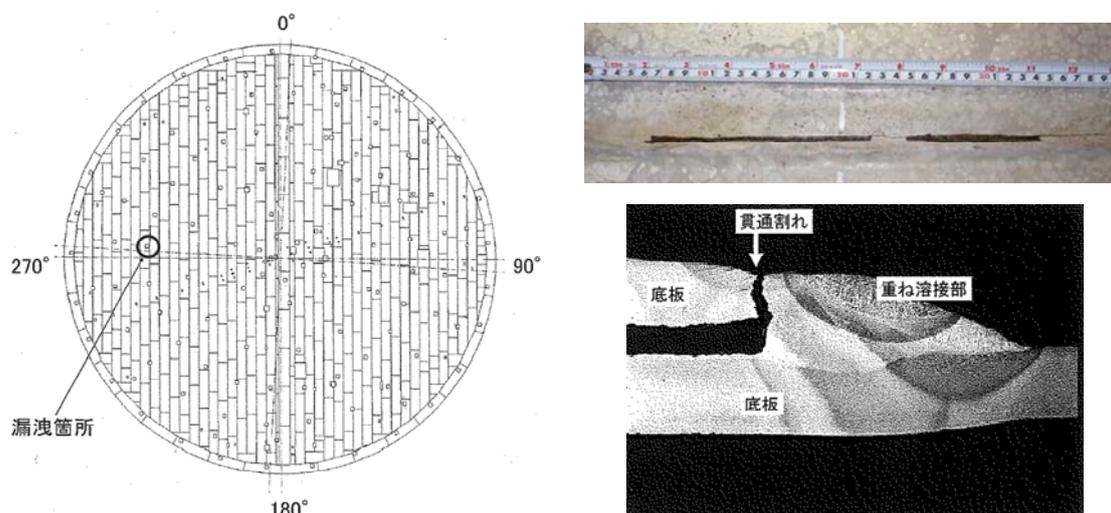


図 2.6 低サイクル疲労による溶接破断部

(5) ルーフサポート用当板近傍の底部板溶接部の割れ (図 2.7 参照)

①事故概要

横浜市内の製油所の旧法新基準適合タンクで底板相互の重ね継手溶接部が破断し、ガソリンが流出した。

②発生日時 2011年1月5日 11時15分ごろ
(直近の保安検査から約3年5か月後)

③タンク概要

- ・形式 浮き屋根式
- ・寸法 直径 46.500m×高さ 15.275m
- ・容量 20,171 キロリットル
- ・内容物 ガソリン
- ・アニュラ板：材質 SS41 板厚 8mm 底板；材質 SS41 板厚 8mm

④事故原因

タンクを開放して危険物流出箇所を特定したところ、ルーフサポート用当板近傍のタンク底板の重ね溶接の溶接線に長さ約 450mm のコーティング及び底板の割れが発見された。原因については現在調査中である。

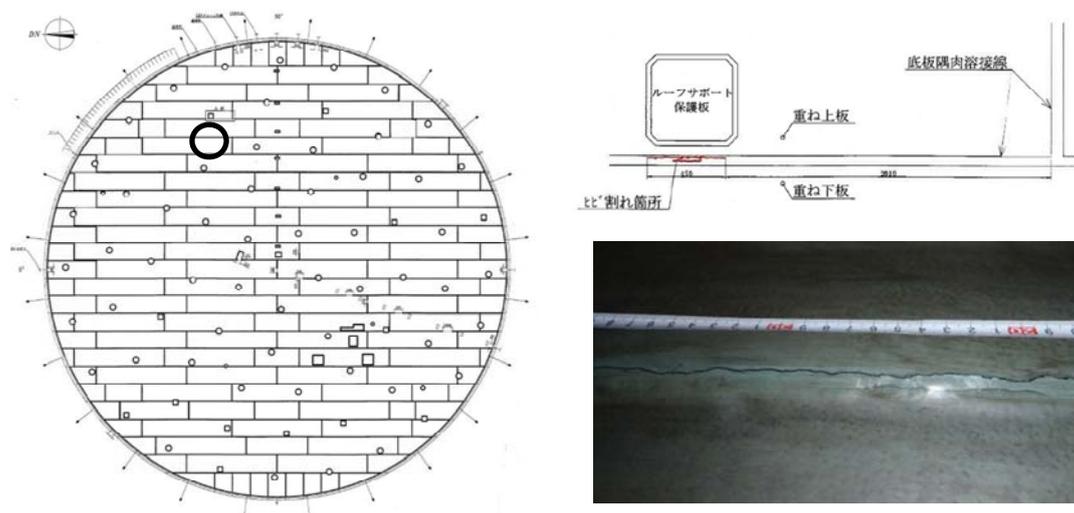


図 2.7 ルーフサポート用当板近傍の溶接破断部

これらの5事例からは、底部の破断による危険物流出事故の発生要因として次の点の影響が密接であると考えられる。これらの項目は保安検査のあり方の検討において評価が必要になると考えられる。

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none">① 基礎地盤の堅固さ（不等沈下、局部沈下など）② 耐震性（保有水平耐力：既に技術基準化済）③ 溶接部の健全性（内在欠陥、低サイクル疲労など） |
|--|

2.4 経年劣化による危険物流出事故の発生プロセス

タンクの底部の経年劣化から危険物流出事故に至る過程を図 2.8 にまとめた。タンクには経年とともに腐食や溶接部欠陥（またはこれらの複合）により強度が低下した劣化箇所が発生する。開放点検によって事前に劣化箇所が見つければ補修され、タンクは再度健全な状態に戻るが、開放点検より前にさらに劣化が進行した場合及び開放点検で劣化箇所が見落とされた場合は、液圧（変動）や地震を誘因として危険物流出事故に至る。

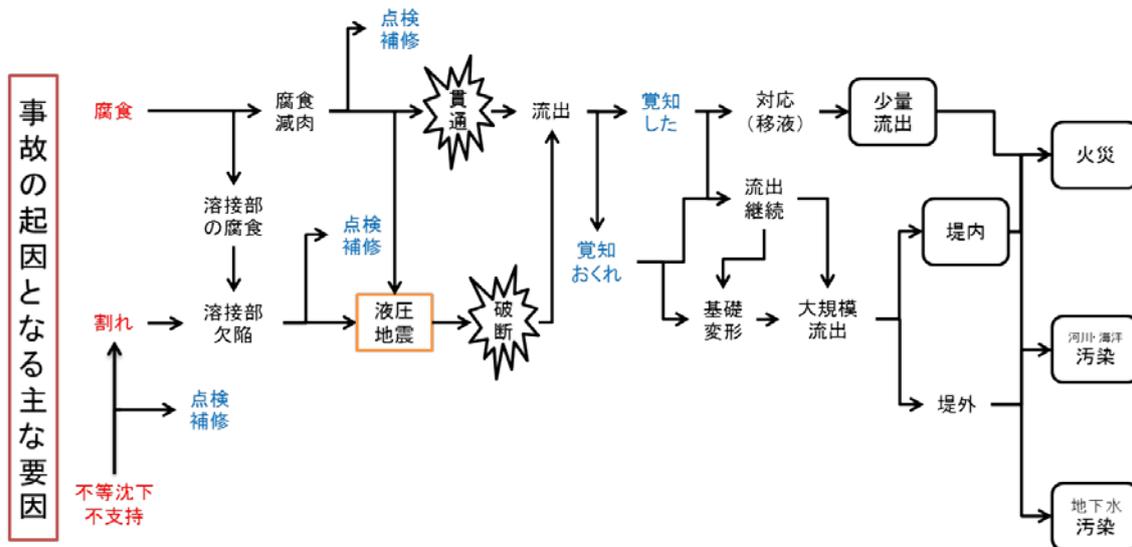
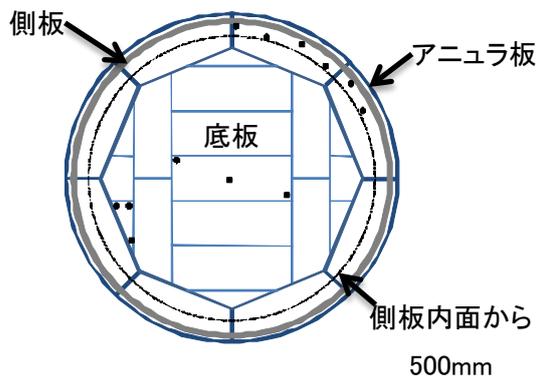


図 2.8 事故発生プロセスフロー図

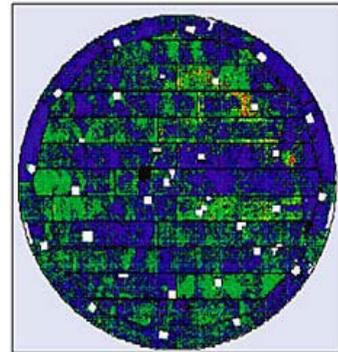
2.5 底部板の腐食による危険物流出に対する安全性の確保

平成 22 年度に実施した「屋外タンク貯蔵所の保安検査の周期に係る調査検討会」では、新法タンクの底部板の腐食の実態について詳細な調査を行った結果、現在の検査方法（定点板厚測定）を維持したまま基本周期を延長することは流出危険性が大幅に高まることから適当でないとし、腐食による流出事故に対する安全性を確保するために、連続板厚測定によって底部板全面にわたって確認された腐食データから、1 年当たりの腐食量及び底部板の最小値に基づいた保安検査周期を定めることが出来るとされた。板厚の測定方法について図 2.9 に示す。連続板厚測定は、30mm 以下のピッチで底部板の板厚を連続的に測定する測定方法であり、旧法タンクにおいても詳細な腐食データを把握する意味で有効であると考えられる。ただし、保安検査の対象となる 1 万キロリットル以上の屋外貯蔵タンクにおいて、新法タンクの底部板の最小板厚は 12mm と規定されているのに対し、旧法タンクのそれは 3.2mm となっており、技術基準の違いによる差が大きく、旧法タンクの腐食に対する安全性を評価するにあたっては、旧法タンクの腐食データに基づいた検証が必要になるものと考えられる。



定点板厚測定

アニュラ板: 2m ピッチ
 底板: 板1枚当たり3点



連続板厚測定

アニュラ板: 30mm ピッチ以下
 底板: 30mm ピッチ以下

図 2.9 底部板の板厚測定方法

表 2.1 通常時の危険物流出事故事例

No.	発生年月日	許可容量 (k1)	貯蔵 油種	発生 箇所	箇所 詳細	設置年月日	経過 年	被害範囲	流出量 (k1)
1	1974/04/15	不明	重油	不明	不明	不明	不明	防油堤内	160
2	1974/06/12	不明	重油	底板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	防油堤内	0.1
3	1974/08/08	不明	重油	底板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	防油堤内	不明
4	1974/10/31	不明	硫酸	側板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	防油堤内	0.0001
5	1974/12/17	50,000	ミナス 重油	不明	不明	不明	不明	不明	0.5
6	1974/12/18	50,000	C 重油	底板 溶接部	き裂部	1973/12/15	1.0	海上	42,888
7	1974/12/28	1,000	A 重油	不明	不明	不明	不明	防油堤内	0.5
8	1975/02/20	不明	重油	底板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	敷地内	不明
9	1975/04/01	3,350	重油	側板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	敷地内	0.1
10	1975/04/22	10	A 重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1964/04/01	11.1	付近水田 ・ハス田	3.5
11	1975/05/30	不明	粗ター ル	底板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	防油堤内	192
12	1975/08/29	不明	クロールス ルホン酸	底板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	敷地内	0.01
13	1975/09/12	不明	塩酸	側板 母材部	腐食 開孔部	1973/06/25	2.2	敷地内	0.1
14	1975/09/20	1,084	A 重油	側板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	防油堤内	0.2
15	1976/05/14	30,000	重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1969/07/31	6.8	防油堤内	0.2
16	1976/09/28	44	ミナス 重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1961/12/07	14.8	防油堤内	0.8
17	1976/10/8	不明	重油	底板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	敷地内	0.1

No.	発生年月日	許可容量 (k1)	貯蔵 油種	発生 箇所	箇所 詳細	設置年月日	経過 年	被害範囲	流出量 (k1)
18	1977/01/31	30,000	C重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1971/09/16	5.4	防油堤内	85
19	1977/02/07	不明	廃液、トルエ ン及び塩素 化炭化水素 の混合物	底板 母材部	腐食 開孔部	1975/05/22	1.7	防油堤内	0.1
20	1977/03/17	241	重油	底板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	公共下水 管	9
21	1977/11/07	不明	JET A-1	底板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	海上	0.5
22	1977/12/08	4,700	軽油	底板 溶接部	き裂部	1958/04/28	19.6	防油堤内	不明
23	1978/02/27	988	重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1968/03/27	9.9	ドレンボッ クス下部	0.0005
24	1978/05/15	4,740	重油	側板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	敷地内	0.04
25	1978/06/16	24,000	原油	底板 母材部	腐食 開孔部	1973/09/17	4.7	防油堤内	49.7
26	1978/07/29	3,000	重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1968/02/02	10.5	敷地内	1.2
27	1979/01/08	300	B重油	底板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	構内排水 溝	2.7
28	1979/02/04	50,000	原油	底板 溶接部	き裂部	1964/02/27	14.9	構内排水 溝	50
29	1979/02/13	7,350	C重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1968/02/02	11.0	敷地内	1.2
30	1979/04/22	22,855	C重油	底板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	敷地内	0.02
31	1979/08/08	160	重油	底板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	敷地内	22
32	1979/11/24	不明	第1石油 類	側板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	敷地内	0.2
33	1979/12/21	不明	ミナス 重油	底板 母材部	き裂部	不明	不明	防油堤内	0.5

No.	発生年月日	許可容量 (k1)	貯蔵 油種	発生 箇所	箇所 詳細	設置年月日	経過 年	被害範囲	流出量 (k1)
34	1980/02/06	99,000	原油	底板 溶接部	き裂部	1971/09/14	8.4	敷地内	0.07
35	1980/02/23	4,000	C重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1958/04/01	21.9	防油堤内	10.9
36	1980/05/12	30	酢酸エチル とジクロロ メタンの混 合液	底板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	敷地内	0.003
37	1980/06/12	不明	ポリブ テン	側板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	防油堤内	不明
38	1980/06/16	390	C重油	底板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	敷地内	3
39	1980/06/26	30,000	灯油	底板 母材部	腐食 開孔部	1959/02/10	21.4	敷地内	16
40	1980/08/01	不明	ガソリ ン	底板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	敷地内	不明
41	1980/08/09	不明	ミナス 重油	側板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	敷地内	1.6
42	1980/09/28	不明	重油	底板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	防油堤内	2
43	1980/12/06	3,180	ナフサ	底板 母材部	腐食 開孔部	1972/01/17	8.9	敷地内	不明
44	1980/12/22	10,926	軽油	底板 母材部	腐食 開孔部	1972/03/04	8.8	敷地内	不明
45	1981/03/20	不明	アセト ン	底板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	敷地内	0.2
46	1981/06/22	不明	C重油	側板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	敷地内	0.0002
47	1981/08/06	28	A重油	側板 溶接部	腐食 開孔部	1978/03/18	3.4	敷地内	0.001
48	1981/09/01	4,655	C重油	側板 溶接部	腐食 開孔部	1972/02/21	9.5	敷地内	0.0195
49	1981/12/02	150	A重油	底板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	隣接田	5

No.	発生年月日	許可容量 (k1)	貯蔵 油種	発生 箇所	箇所 詳細	設置年月日	経過 年	被害範囲	流出量 (k1)
50	1982/02/05	3	灯油	底板 母材部	腐食 開孔部	1970/10/27	11.3	構外河川	0.1
51	1982/07/01	140	メタノ ール	側板 母材部	腐食 開孔部	1970/07/22	12.0	敷地内	不明
52	1982/08/10	1,024	ガソリ ン	底板 母材部	腐食 開孔部	1964/01/24	18.6	構外畑地	46.1
53	1982/09/29	2,000	C重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1969/05/01	13.4	敷地内	0.8
54	1982/10/21	995	大豆油	底板 母材部	腐食 開孔部	1970/05/09	12.5	敷地内	不明
55	1982/12/09	500	重油	底板 溶接部	き裂部	1961/11/18	21.1	防油堤内	0.003
56	1982/12/22	31	C重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1971/10/19	11.2	防油堤内	0.2
57	1982/12/24	120	重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1968/05/23	14.6	海上	60
58	1984/04/23	10	A重油	底板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	構外河川	0.1
59	1984/05/15	510	A重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1963/11/01	20.6	敷地内	17.8
60	1984/11/22	300	C重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1971/06/28	13.4	敷地内	0.3
61	1984/12/10	1,500	B重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1952/06/12	32.5	敷地内	0.6
62	1985/06/11	109,817	原油	底板 母材部	腐食 開孔部	1972/10/03	12.7	防油堤内	0.1
63	1985/08/23	2,000	クレオソ ート油	側板 母材部	腐食 開孔部	1980/05/07	5.3	防油堤内	1
64	1985/10/04	145	灯油	底板 溶接部	き裂部	1973/10/25	12.0	隣接水田	0.2
65	1985/10/29	106	濃硫酸	底板 母材部	腐食 開孔部	1976/12/02	8.9	防油堤内	1.9
66	1985/11/29	500	軽油	底板 母材部	腐食 開孔部	1966/04/04	19.7	防油堤内	5

No.	発生年月日	許可容量 (k1)	貯蔵 油種	発生 箇所	箇所 詳細	設置年月日	経過 年	被害範囲	流出量 (k1)
67	1986/01/06	600	エピクロル ヒドリン	底板 母材部	腐食 開孔部	1967/12/16	18.1	防油堤内	4.5
68	1986/08/30	15	B重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1974/03/27	12.4	防油堤内	0.1
69	1986/11/07	107	灯油	底板 母材部	腐食 開孔部	1974/02/04	12.8	犬走り部	不明
70	1987/06/11	50	潤滑油	底板 母材部	腐食 開孔部	1973/03/28	14.2	防油堤内	不明
71	1987/09/08	20	脱硫C重 油	側板 母材部	腐食 開孔部	1970/10/07	16.9	防油堤内	10.4
72	1987/09/09	145	A重油	底板 母材部	き裂部	1971/06/29	16.2	海上	9.7
73	1988/07/05	82,641	原油	底板 溶接部	き裂部	1975/03/06	13.3	敷地内	0.4
74	1988/08/26	2,000	重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1968/07/18	20.1	防油堤内	0.2
75	1989/12/17	84,548	原油	底板 母材部	腐食 開孔部	1973/08/03	16.4	防油堤内	0.8
76	1991/02/24	15	重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1969/03/03	22.0	敷地内	2
77	1991/09/06	4,000	溶融硫 黄	側板 母材部	腐食 開孔部	1969/09/10	22.0	敷地内	0.3
78	1991/10/04	2,400	溶融硫 黄	側板 母材部	腐食 開孔部	1976/11/18	14.9	防油堤内	43.7
79	1992/07/29	40	重油	側板 母材部	腐食 開孔部	1979/03/28	13.3	防油堤内	0.001
80	1992/08/21	995	重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1961/03/23	31.4	防油堤内	5
81	1992/11/24	1,750	ガソリ ン	側板 母材部	き裂部	1961/12/06	31.0	防油堤内	0.2
82	1994/07/01	50	軽油	側板 母材部	腐食 開孔部	1973/11/29	20.6	犬走り部	0.0005
83	1994/08/10	125	潤滑油	底板 母材部	腐食 開孔部	1964/10/05	29.9	犬走り部	0.9

No.	発生年月日	許可容量 (k1)	貯蔵 油種	発生 箇所	箇所 詳細	設置年月日	経過 年	被害範囲	流出量 (k1)
84	1994/08/25	500	灯油	側板 母材部	腐食 開孔部	1973/10/03	20.9	犬走り部	0.001
85	1995/01/07	420	A 重油	側板 母材部	腐食 開孔部	1967/12/22	27.1	被害なし	不明
86	1995/01/13	28,970	軽油	底板 溶接部	き裂部	1968/05/15	26.7	防油堤内	142.6
87	1995/03/27	192	A 重油	底板 溶接部	き裂部	1966/06/05	28.8	海上	0.2
88	1995/05/18	10	重油	側板 母材部	腐食 開孔部	1973/07/06	21.9	構外河川	8.5
89	1996/02/29	30	重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1969/04/23	26.9	海上	1.2
90	1997/04/13	110,000	原油	底板 母材部	腐食 開孔部	1972/09/28	24.6	防油堤内	1.3
91	1997/05/09	300	ガソリン	底板 母材部	腐食 開孔部	1970/11/02	26.5	構外河川	不明
92	1997/05/28	200	A 重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1971/06/02	26.0	海上	26
93	1997/07/10	670	軽油	底板 母材部	腐食 開孔部	1976/11/16	20.7	防油堤内	0.1
94	1997/11/13	20	A 重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1973/02/03	24.8	構外河川	0.2
95	1998/03/04	500	灯油	底板 母材部	腐食 開孔部	1971/11/19	26.3	海上	不明
96	1998/05/23	200	重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1972/03/28	26.2	防油堤内	20
97	1998/07/04	30	A 重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1971/08/30	26.9	構外河川	0.5
98	1999/01/09	12	重油	底板 母材部	き裂部	1970/07/30	28.5	防油堤内	0.7
99	1999/01/15	54	軽油	側板 母材部	腐食 開孔部	1972/09/02	26.4	海上	1
100	1999/05/21	1,450	ガソリン	側板 母材部	腐食 開孔部	1972/11/13	26.5	防油堤内	0.003

No.	発生年月日	許可容量 (k1)	貯蔵 油種	発生 箇所	箇所 詳細	設置年月日	経過 年	被害範囲	流出量 (k1)
101	1999/06/11	4	軽油	底板 母材部	腐食 開孔部	1976/12/08	22.5	犬走り部	不明
102	1999/08/12	481	C重油	側板 母材部	腐食 開孔部	1963/10/24	35.8	防油堤内	0.02
103	1999/10/11	2,160	C重油	側板 母材部	腐食 開孔部	1972/10/05	27.0	敷地内	0.5
104	1999/10/20	880	A重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1980/12/15	18.9	海上	6.3
105	2001/06/01	4,880	ガソリ ン	側板 母材部	腐食 開孔部	1970/09/29	30.7	防油堤内	不明
106	2001/06/27	50,000	原油	底板 母材部	腐食 開孔部	1970/12/04	30.6	防油堤内	8
107	2001/08/15	15	重油	側板 母材部	腐食 開孔部	1966/02/23	35.5	防油堤内	0.3
108	2001/07/31	2,050	JET A-1	側板 母材部	腐食 開孔部	1970/11/19	30.7	防油堤内	0.1
109	2001/12/29	35,000	原油	側板 母材部	腐食 開孔部	1969/04/10	32.7	防油堤内	0.002
110	2002/04/01	455	FCC ボト ム油	底板 母材部	腐食 開孔部	1957/02/05	45.2	海上	不明
111	2002/06/07	1,255	C重油	側板 母材部	腐食 開孔部	1975/12/09	26.5	敷地内	0.005
112	2002/07/02	40,000	原油	側板 母材部	腐食 開孔部	1971/05/26	31.1	敷地内	不明
113	2002/09/05	500	C重油	側板 母材部	腐食 開孔部	1970/10/27	31.9	防油堤内	2
114	2003/01/25	9,800	原油	底板 母材部	腐食 開孔部	1967/12/26	35.1	敷地内	0.03
115	2003/02/07	995	軽油	底板 母材部	腐食 開孔部	1962/01/18	41.1	敷地内	0.1
116	2003/02/24	700	キシレ ン	底板 母材部	腐食 開孔部	1965/12/28	37.2	海上	不明
117	2003/03/15	50,000	原油	底板 母材部	腐食 開孔部	1970/03/15	33.0	敷地内	0.13

No.	発生年月日	許可容量 (k1)	貯蔵 油種	発生 箇所	箇所 詳細	設置年月日	経過 年	被害範囲	流出量 (k1)
118	2003/03/20	57	重油	側板 母材部	腐食 開孔部	1976/04/15	26.9	敷地内	0.2
119	2003/03/27	8	重油	側板 母材部	腐食 開孔部	1992/09/04	10.6	敷地内	0.1
120	2003/06/11	100	重油	底板 溶接部	き裂部	1971/06/11	32.0	構外河川	不明
121	2003/07/07	2,000	スチレン	底板 母材部	腐食 開孔部	1981/11/04	21.7	敷地内	0.2
122	2003/10/23	40	重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1967/10/12	36.1	防油堤内	0.1
123	2003/12/15	2,330	重油	側板 母材部	腐食 開孔部	1968/09/18	35.3	防油堤内	0.04
124	2004/06/01	130	重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1973/07/25	30.9	防油堤内	0.4
125	2004/07/22	7,830	重油	側板 母材部	腐食 開孔部	1980/10/21	23.8	防油堤内	0.045
126	2005/01/06	28	重油	側板 母材部	腐食 開孔部	1968/12/27	36.1	防油堤内	0.4
127	2005/05/26	10	重油	側板 母材部	腐食 開孔部	1976/11/02	28.6	防油堤内	0.001
128	2005/07/01	1,680	重油	側板 溶接部	腐食 開孔部	1969/03/27	36.3	防油堤内	0.1
129	2005/09/15	12,000	軽油	側板 母材部	腐食 開孔部	1972/12/27	32.7	防油堤内	0.2
130	2005/09/21	7,000	重油	側板 母材部	腐食 開孔部	1959/04/03	46.5	防油堤内	0.1
131	2005/11/14	620	メチルイソブ チルケトン	側板 母材部	腐食 開孔部	1970/02/12	35.8	防油堤内	0.003
132	2005/11/22	620	酢酸ブ チル	側板 母材部	腐食 開孔部	1970/01/27	35.8	防油堤内	不明
133	2005/12/07	3,400	ナフサ	底板 母材部	腐食 開孔部	1973/09/17	32.2	構外河川	80
134	2006/03/01	10	灯油	底板 母材部	腐食 開孔部	1974/11/09	31.3	水路	不明

No.	発生年月日	許可容量 (k1)	貯蔵 油種	発生 箇所	箇所 詳細	設置年月日	経過 年	被害範囲	流出量 (k1)
135	2006/04/08	20	重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1975/07/16	30.8	構内排水 溝	不明
136	2006/06/08	234	硝酸	底板 溶接部	き裂部	1968/06/11	38.0	防油堤内	0.0002
137	2006/07/01	15	重油	側板 母材部	腐食 開孔部	1977/02/18	29.4	構外水田	1.2
138	2006/07/06	24,250	軽油	側板 母材部	腐食 開孔部	1971/12/27	34.5	防油堤内	不明
139	2006/07/16	20	重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1981/07/11	25.0	防油堤内	1
140	2006/08/01	9,950	重油	側板 母材部	腐食 開孔部	1972/03/04	34.4	防油堤内	不明
141	2006/08/10	5,060	ガソリ ン	側板 母材部	腐食 開孔部	1972/03/04	34.5	敷地内	不明
142	2007/03/15	740	重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1973/09/06	33.5	敷地内	50
143	2007/04/01	200	重油	底板 溶接部	腐食 開孔部	1978/06/19	28.8	防油堤内	0.002
144	2007/05/13	200	スラッ ジ	側板 母材部	腐食 開孔部	1973/12/17	33.4	防油堤内	不明
145	2007/11/26	53,620	ガソリ ン	側板 母材部	腐食 開孔部	1974/10/15	33.1	防油堤内	0.012
146	2008/08/20	6	エチレンジ クロライド	底板 母材部	腐食 開孔部	1971/12/11	36.7	防油堤内	0.04
147	2008/04/30	176	ポリエ ーテル	側板 母材部	腐食 開孔部	1970/11/20	37.5	防油堤内	1.02
148	2008/06/13	14	アタプロ ン乳剤	底板 母材部	腐食 開孔部	1975/11/14	32.6	防油堤内	0.002
149	2009/08/31	1,730	C重油	側板 母材部	腐食 開孔部	1960/05/20	49.3	防油堤内	0.006
150	2009/09/17	2	軽油	側板 母材部	腐食 開孔部	1974/07/10	35.2	防油堤内	若干
151	2009/01/16	520	メタクリル 酸メチル	底板 母材部	腐食 開孔部	1974/10/03	34.3	防油堤内	0.045

No.	発生年月日	許可容量 (k1)	貯蔵 油種	発生 箇所	箇所 詳細	設置年月日	経過 年	被害範囲	流出量 (k1)
152	2009/12/24	40	1.4-ブタン ジオール	底板 母材部	き裂部	1986/01/30	23.9	防油堤内	0.4
153	2009/12/22	900	再生油	底板 母材部	腐食 開孔部	1977/07/07	32.5	防油堤内	30

表 2.2 地震時の危険物流出事故事例

No.	発生年月日	許可容量 (k1)	貯蔵 油種	発生 箇所	設置年月日	経過 年	発生地震	流出量 (k1)
1	1978/06/12	31,421	灯油	底部隅角部	1972/08/15	5.8	宮城県沖地震	滲み
2	1978/06/12	31,470	重油	底部き裂	1972/11/08	5.6	宮城県沖地震	26,798
3	1978/06/12	31,508	重油	底部き裂	1972/12/18	5.5	宮城県沖地震	23,705
4	1978/06/12	23,608	減圧軽油	底部き裂	1973/01/25	5.4	宮城県沖地震	45
5	1978/06/12	23,588	減圧軽油	底部き裂	1973/01/25	5.4	宮城県沖地震	17,644
6	1983/05/26	2,000	軽油	底部隅角部	不明	12.7	日本海中部地震	滲み
7	1983/05/26	1,000	軽油	底部ドレン部	不明	11.6	日本海中部地震	滲み
8	1993/01/15	1,035	アスファ ルト	側板座屈部	1972/07/29	20.5	釧路沖地震	900t
9	1993/01/15	5,000	重油	側板座屈部	不明	不明	釧路沖地震	不明
10	1995/01/17	420	A重油	側板	1967/12/22	27.1	兵庫県南部地震	滲み
11	1995/01/17	990	エチルア ルコール	側板座屈部	1973/09/21	21.3	兵庫県南部地震	3
12	2011/03/11	4,920	A重油	底部溶接部	1973/07/16	37.7	東北地方太平洋 沖地震	滲み

第3章 屋外タンクの技術基準、保安検査の現状と課題

3.1 特定屋外タンク貯蔵所に係る技術基準

3.1.1 新法タンク

いわゆる「新法」とは、昭和52年政令第10号（以下「昭和52年政令」という。）による改正後の危険物の規制に関する政令（以下「危政令」という。）第11条第1項第3号の2（基礎及び地盤）及び第4号（タンク本体）に基づく技術基準をいい、この危政令施行日以降に設置許可申請された特定屋外タンク貯蔵所は、一般的に「新法タンク」とよばれている。

3.1.2 旧法タンク

いわゆる「旧法」とは、昭和34年政令第306号に基づく屋外タンク貯蔵所に係る技術基準をいい、この「旧法」により設置されている特定屋外タンク貯蔵所を一般的に「旧法タンク」と呼んでいる。

昭和52年政令附則第3項により、「新法」に適合しないタンクについては、従前の例によることとされたため、昭和52年政令の施行後も旧法タンクが残ることとなった。

なお、平成6年政令第214号により、昭和52年政令附則が改正され、旧法タンクの耐震改修のための技術基準として「新基準」が制定され、改修等のための一定の経過期間が設けられた。（1万キロリットル以上：平成21年21月31日まで）

（1）新基準（第二段階基準）

新基準（改正後の昭和52年政令附則第3項）に適合し、適合している旨の「新基準適合届出」をした旧法タンクのうち、「第一段階基準」以外の旧法タンクをいう。

（2）第一段階基準

新基準に適合し新基準に適合している旨の「新基準適合届出」をした旧法タンクのうち、第一段階基準に適合し第一段階基準に適合している旨の「第一段階基準適合届出」をしたタンクをいう。

3.2 保安検査

3.2.1 保安検査の概要

保安検査とは、容量1万キロリットル以上の液体の危険物を貯蔵する屋外タンク貯蔵所について、タンク所有者等が自ら点検を行った後に市町村長等がタンクの底部を定期的に検査するものである。保安検査においては底部の板の厚さ及び底部の溶接部に関する事項が技術上の基準に適合していることを確認しなければならない。

3.2.2 保安検査の時期

保安検査を受けなければならない時期は、タンクが適合している技術基準に応じて定められている。新法タンク及び旧法第一段階基準タンクについては基本周期が8年、旧法新基準タンクについては基本周期が7年と定められている。また、保安のための措置を講じたタンクについては個別に開放周期を延長する制度が規定されており、措置の内容と技術基準に応じた検査周期が規定されている。保安検査の時期についてまとめたものを表3.1に示す。

表 3.1 保安検査の周期

		基本周期 (H6年)	個別延長		
			措置内容	検査周期	制定
新法タンク		8年	腐食防止	10年	H6年
			貯蔵管理	10年	H6年
			腐食量管理	13年	H15年
			連続板厚測定	8～15年	H23年
旧法タンク	第一段階基準 タンク	8年	腐食防止	10年	H6年
			貯蔵管理	10年	H6年
			腐食量管理	13年	H15年
			連続板厚測定	8～15年	H23年
	新基準タンク	7年	腐食防止	10年	H6年
			貯蔵管理	9年	H6年

※特定屋外タンク貯蔵所において、不等沈下率が 1/100 以上であることが確認されたタンクについても保安検査を受けなければならない。

3.2.3 保安検査に伴う補修工事

屋外貯蔵タンクの底部補修工事は、主に底部板の板厚及び溶接部において技術上の基準に適合しない箇所が確認された場合に実施されるものである。平成12年度以降実施された保安検査の基数を表3.2に、保安検査に伴う底部補修工事の概要を図3.1に示す。「取替・当板補修」は、主に底板裏面からの基準を超える腐食や、底板内面の広範囲にわたる腐食に対して実施される補修工事である。「肉盛り補修」は、主に底板内面からの基準を超える腐食に対して実施される補修工事である。「溶接線補修」は、溶接部検査の結果、危険物の規制に関する規則（以下「規則」という。）第20条の8に適合しない欠陥があった場合等

に実施される補修工事である。特に、溶接線補修は9割以上のタンクで実施されていることから、その経年劣化が進んでいることが伺える。

表 3.2 年度別保安検査実施基数

年度	H12	H13	H14	H15	H16	H17	H18	H19	H20	H21	H22
検査基数	310	304	272	266	260	258	294	293	326	310	254

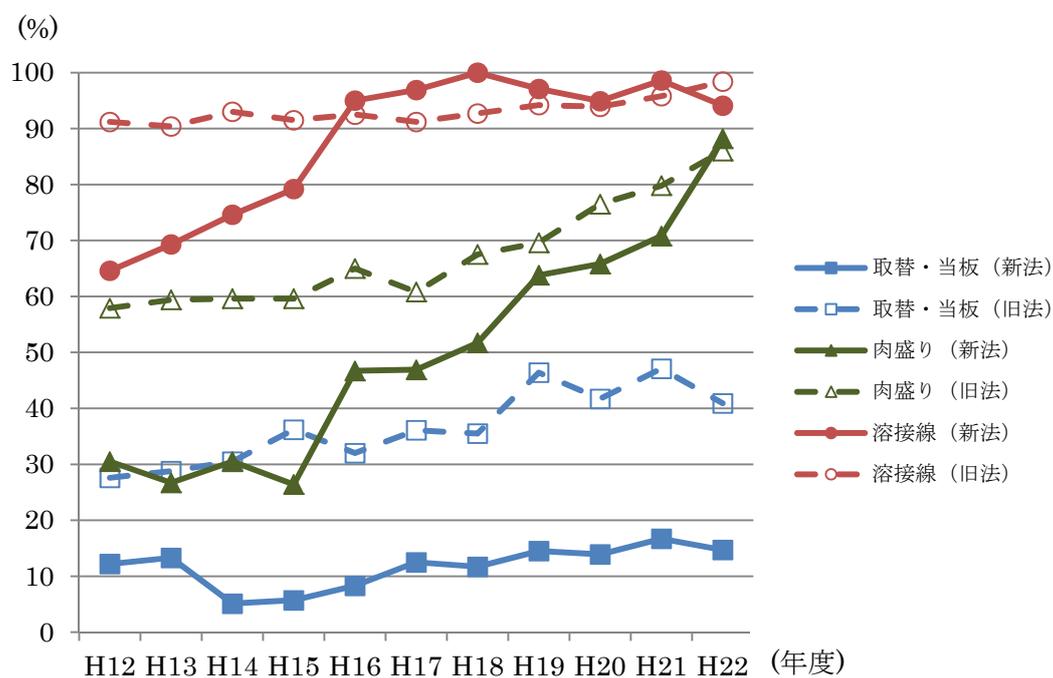


図 3.1 保安検査に伴う補修工事の概要

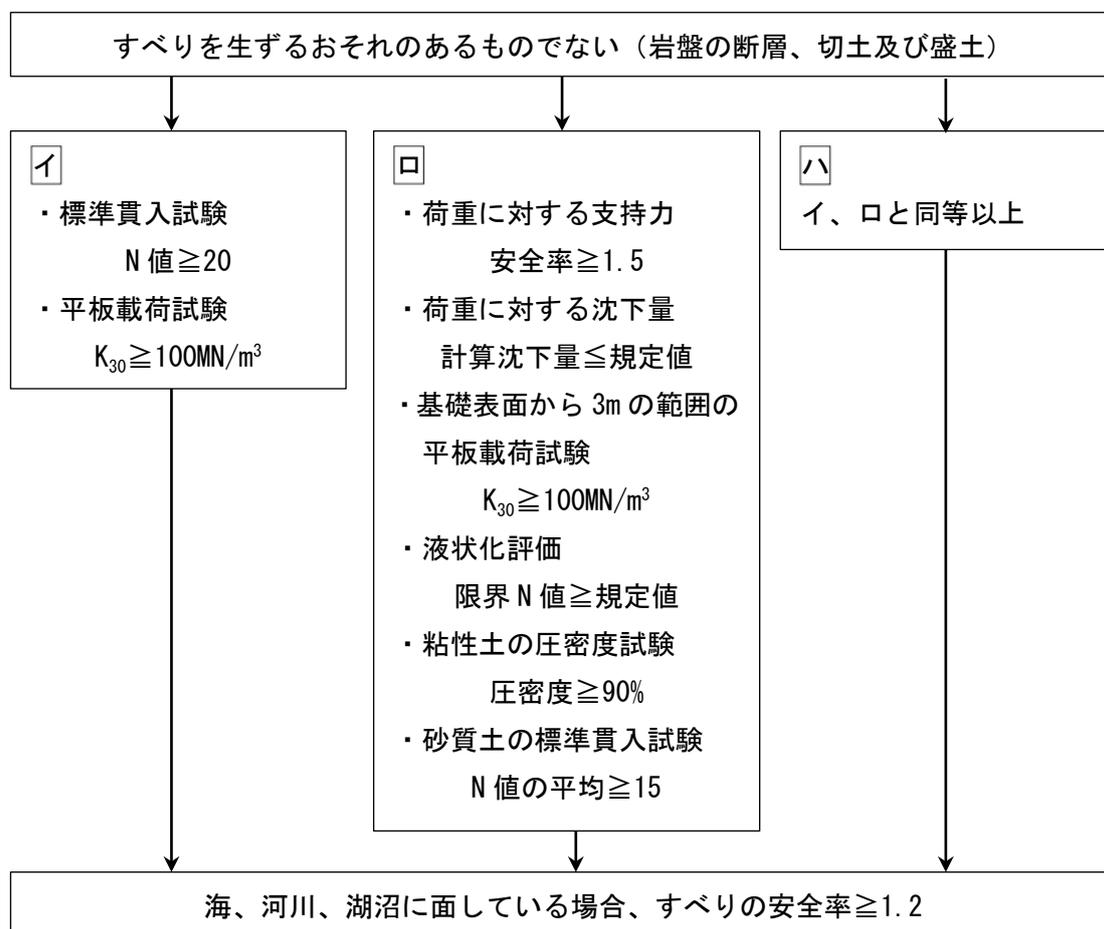
3.3 底部板破断による危険物流出事故を踏まえた課題

これまで整理された危険物流出事故発生プロセスや特定屋外貯蔵タンクの底部板破断による危険物流出事故事例から、旧法屋外タンク貯蔵所の保安検査のあり方を検討するためには基礎地盤の堅固さ、溶接部の健全性及び旧法タンクの腐食データと検査のあり方について評価することが必要であることが分かった。そこで本年度は基礎地盤の堅固さが底部板の強度に及ぼす影響について調査検討する。

3.3.1 基礎地盤の堅固さについて

新法タンクの地盤に係る技術基準についてまとめたものを図 3.2 に示す。地盤はタンク荷重によって生じる応力に対して安全なものとするほか、標準貫入試験、平板載荷試験、圧密度試験等によって得られた地盤の工学的性状により堅固さを確認していることがわかる。

図 3.2 新法タンクの地盤に係る技術基準



一方、旧法新基準タンクの地盤については、設置されてから貯蔵液を含んだタンク荷重により地盤が締め固められていることが期待されるため、技術基準としては液状化の項目があるのみとなっている。すなわち、旧法新基準タンクの地盤の性状は工学的指標により確認されていないこととなる。以上のことから、旧法新基準タンクの基礎地盤が受ける荷

重と変位の関係を明らかにすることを試みる。

3.3.2 不等沈下の点検によるタンク沈下量測定

タンクの不等沈下の点検は定期点検により実施することとなっている。不等沈下の測定は、レベル計等を用いてタンク側板下部の沈下量を全周にわたって計測し、沈下量の最大と最小の差をタンク内径で除した値を不等沈下率と定義している。不等沈下率が 1/100 を超えた場合には保安検査を実施し底部の板厚と溶接部の健全性を確認するとともに、基礎の不陸修正を行わなければならない。

不等沈下の点検によりタンク外周部における沈下量は把握できるものの、タンク内部が液圧等によりどの程度沈下しているかは計測できない。貯蔵液の荷重によるタンクの沈下量がタンク外周部とタンク内部で異なる場合（図 3.3 参照）は、沈下による底部板の相対変位が生じることから応力が作用することとなる。したがって、貯蔵液の荷重によるタンク底板全面の沈下量を把握することは、底部板の強度を評価する上で必要になると考える。

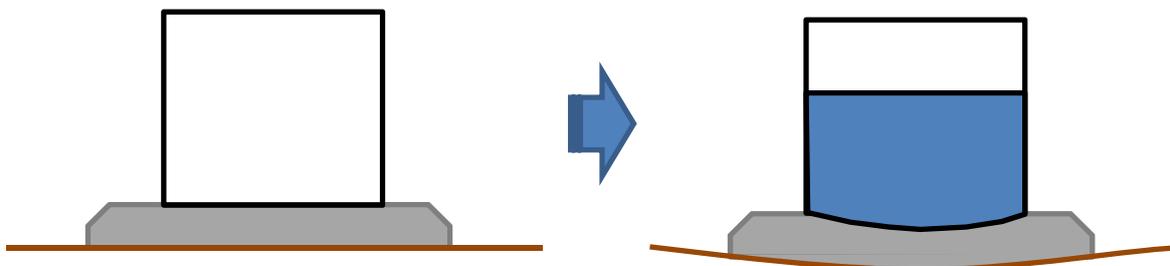


図 3.3 荷重によるタンク沈下のイメージ

3.3.3 局部沈下が底部板の強度に及ぼす影響について

基礎の局部沈下がタンク底部板に及ぼす影響については、これまでいくつかの検討事例がある。「沈下現象が屋外貯蔵タンクに及ぼす影響に関する調査検討報告書」（昭和 60 年 3 月 危険物保安技術協会）によれば、基礎の局部沈下を基礎の円柱状の欠損部として取り扱い、その直径(d)と深さ(δ)の比(d/δ)によって底部板の溶接部に発生する応力を算出しており、その結果を図 3.4 に示す。これによると、範囲が狭く深さが深い (d/δ が小さい) 局部沈下ほど底部板に与える応力が大きなものとなることが示されている。また、局部沈下の寸法が同じである場合には、底部板の重ねすみ肉溶接部のノド部に発生する応力は突合せ溶接継ぎ手に発生する応力の 1.4~2.0 倍となることが示されている。保安検査の対象となる新法タンクの底板相互の溶接は突合せ溶接とすることが技術基準化されているが、旧法タンクの底板相互の溶接は技術基準がないことから重ねすみ肉溶接で施工されているものが多い。従って、旧法タンクの保安検査のあり方を検討する上で局部沈下の影響は考慮する必要があるものの、過去に検討が行われていることから、本年度の調査検討の対象外とする。

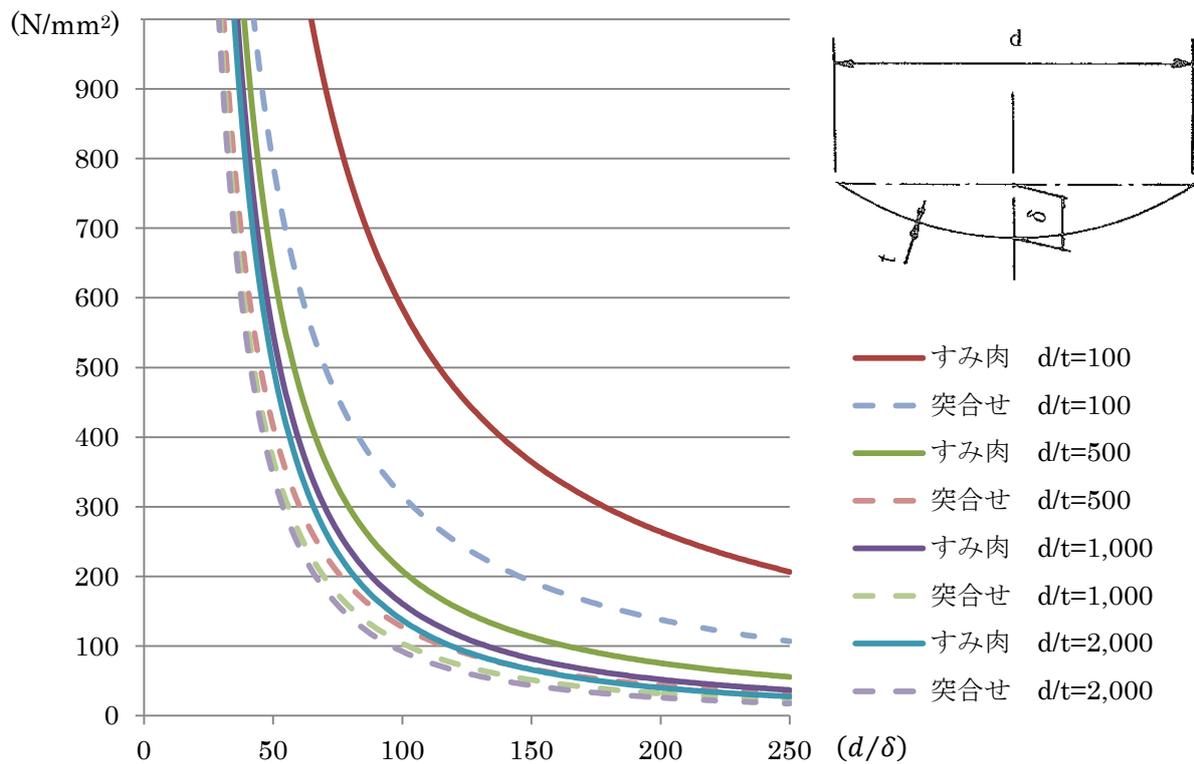


図 3.4 局部沈下箇所にもたがる溶接部に発生する応力

3.3.4 課題の整理

基礎地盤がタンク底部板に及ぼす強度上の影響について考察してきた。これらについてまとめると次のようになる。

- (1) 基礎地盤の堅固さに関する工学的指標を得るために、基礎地盤に係る荷重とそれに伴う沈下量との関係を明らかにする必要がある。
- (2) 荷重と沈下量の関係は、タンク外周部の沈下量とタンク内部の沈下量を併せて評価する必要がある。
- (3) 上記 (1) (2) において得られた基礎地盤の工学的性状を基に、タンク底部の強度評価を実施することが可能となる。
- (4) 基礎の局部沈下がタンク底部に及ぼす強度的影響は、既存の検討において得られた知見に基づいた評価が可能である。

第4章 側板外周部およびタンク内底板の沈下量の計測

4.1 目的と概要

旧法タンクの基礎地盤の堅固さの定量的な評価方法の検討のため、指定された1万キロリットル以上の旧法タンクに対して水張試験時に底板および外周部の沈下計測を行った。さらに沈下計測した旧法タンクに対し有限要素法を用いて沈下シミュレーションを行った。

4.2 計測した旧法タンクと地盤条件

(1) 計測対象タンク

計測の対象とした屋外貯蔵タンクの概要を図4.1、基本寸法等を表4.1に示す。

表4.1 対象とした屋外貯蔵タンクの諸元

住 所	神奈川県横浜市	
対象タンク	浮き屋根式タンク(シングルデッキ)	
計測期間	平成23年12月～平成24年1月	
基本寸法等	内径(mm)	36,830
	側高さ(mm)	21,945
	最高液高(mm)	19,508
	底部勾配	1/120
	許可容量(kl)	20,782
底部板厚	底板(mm)	8
	アニュラ板(mm)	12

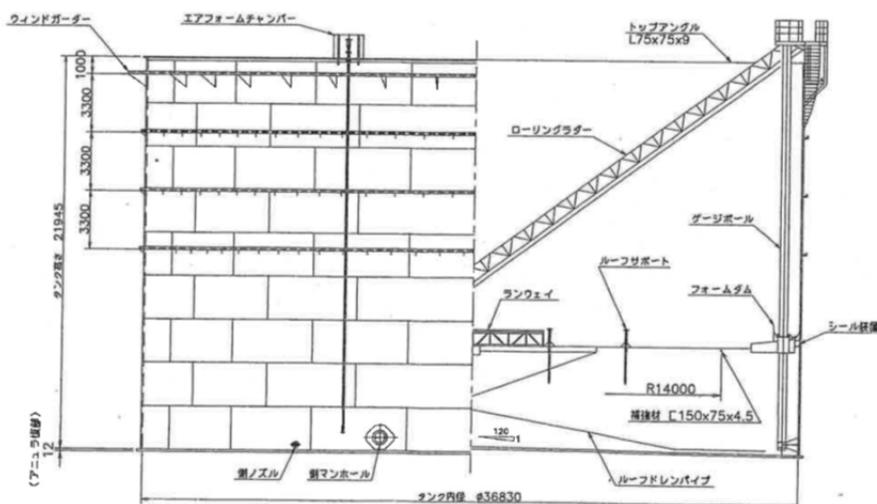


図4.1 対象タンク概略図

なお、本タンクの基礎形式は直接基礎（盛り土基礎）であり、側板直下や盛り土基礎の外周部にRCリングの施工はない。

(2) 地盤条件

地盤調査の位置と種類を図 4.2 に示す.

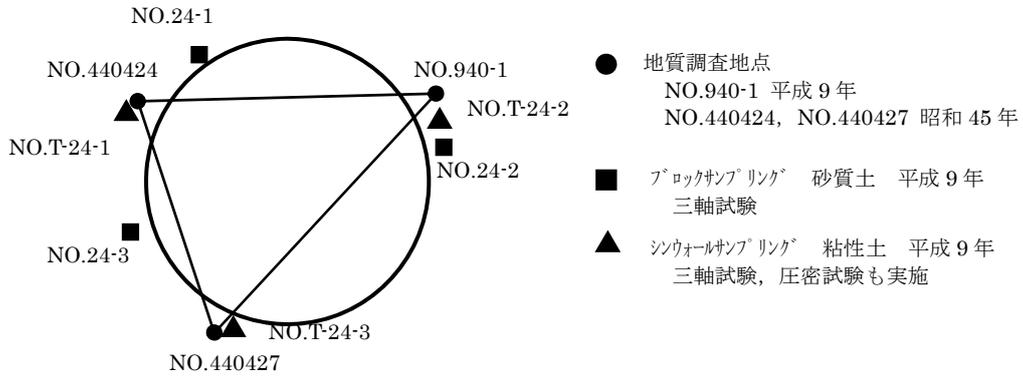


図 4.2 地盤調査の位置と種類

標準貫入試験と圧密試験より得られた圧密降伏応力を図 4.3 に示す.

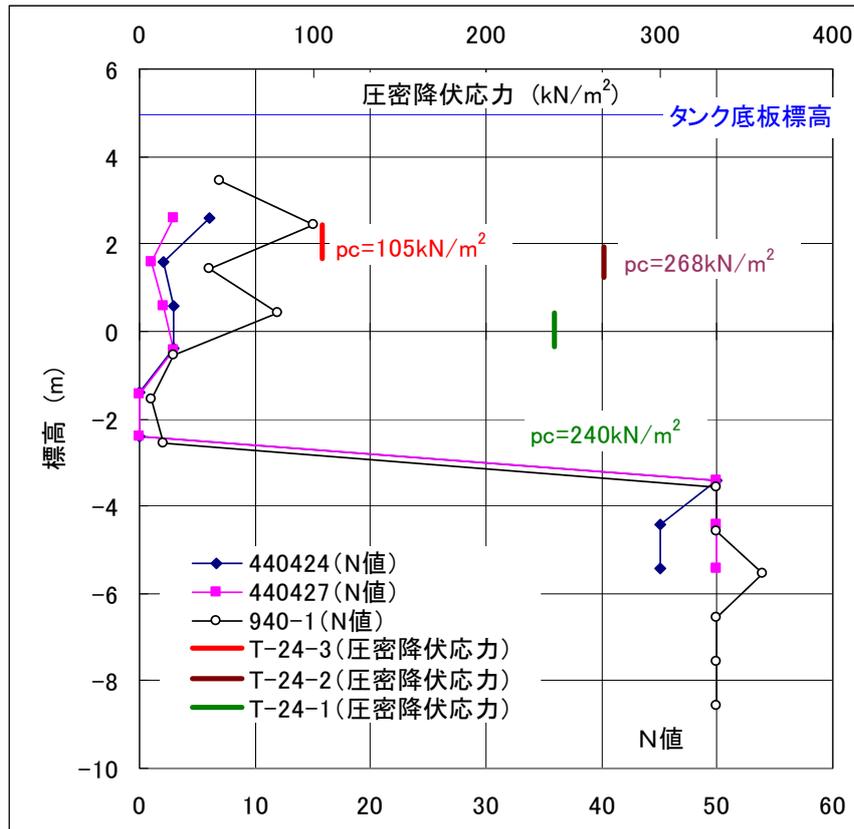


図 4.3 標準貫入試験と圧密降伏応力

図 4.4 に 3 つの圧密試験結果を同時に示す。3 つの圧密試験結果より、圧密降伏応力が明確なのは、 $p_c = 105 \text{ kN/m}^2$ (T-24-3) である。

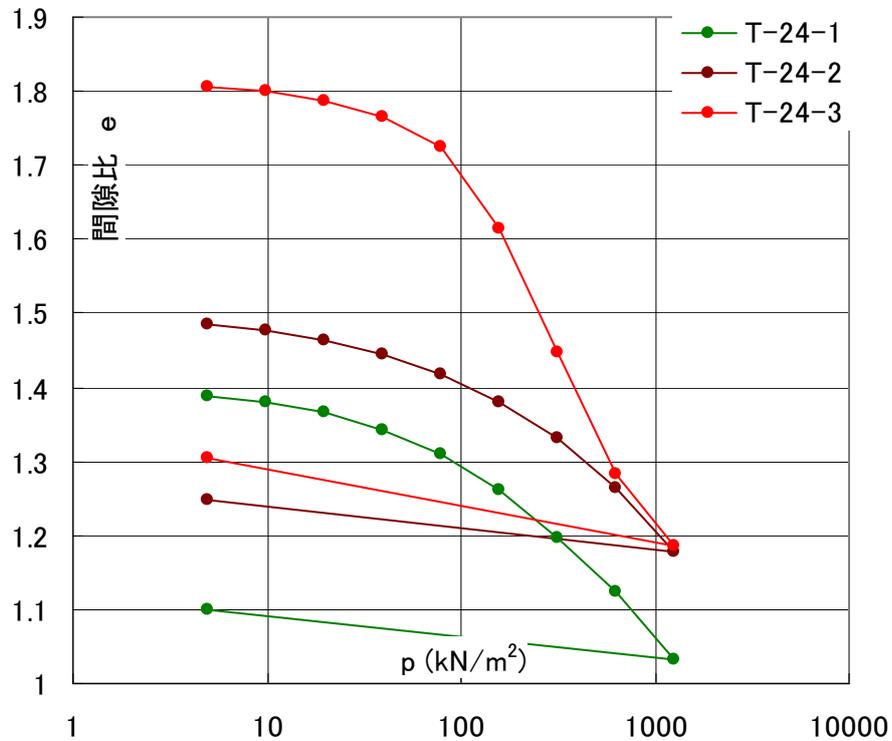


図 4.4 3 つの圧密試験結果

タンク直下の砂質土層よりブロックサンプリングにより試料採取し三軸圧縮試験で強度特性を調べている。表 4.2 に結果を示す。

表 4.2 砂質土部分の強度特性

サンプリング位置	24-1	24-2	24-3	平均
c (kN/m ²)	27.4	11.8	8.8	16.0
ϕ (°)	36.7	35.4	35.4	35.8

粘性土層部分は、T-24-3 の三軸 CU 圧縮試験より得られた強度特性で代表させた。強度特性は次のとおりである。

$$c = 25.48 \text{ kN/m}^2 \quad \phi = 17.33^\circ$$

4.3 側板外周部およびタンク内底板の沈下量の計測

水張試験時の側板外周部およびタンク内底板の沈下量計測を行った。

4.3.1 計測方法

(1) 側板外周部の沈下量計測

側板外周部の沈下量測定は、規則第 20 条の 10 第 1 項第 1 号側板最下段の水平度の計測と同様に、屋外タンク側板最下段を写真 4.1 に示す治具を用いて水準測量によりタンク外周 32 点の沈下量計測を行った（基準とする標高は、検査時に使用する仮ベンチマーク（B.M）とした）。

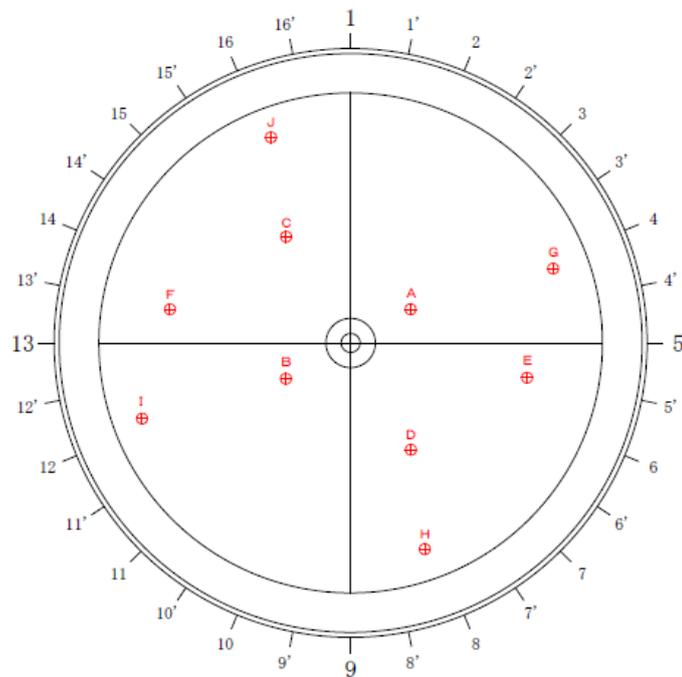


写真 4.1 側板外周部測量用治具

(2) タンク内底板の沈下量計測

タンク内に水張りをを行った影響によるタンク内底板の変形（沈下）量を計測するため、浮き屋根上に存在するルーフサポート孔を利用した。

計測数は、抜き取ったルーフサポート位置による影響が無い位置を 10 箇所選定した。図 4.5 にタンク内底板の沈下量計測位置と側板外周部の沈下測量位置を示す。



No.	A, B	C, D	E, F	G ~ J	1 ~ 16'
中心からの距離(m)	4.5	7.8	11.5	14.0	18.7

図 4.5 底板の沈下量計測位置と側板外周部の沈下測量位置

測定方法は基準標高からタンクの内壁に仮 B.M を設置し、以下の 3 種類の計測を実施した。

- ① レベル測量による沈下量計測
- ② レーザーレベル計による沈下量計測
- ③ タンクスケールによる沈下量計測

タンク内底板部から浮き屋根上までの計測は、JIS1 級の鋼製巻尺を用いた。設置方法は、浮き屋根上の孔位置に設定した計測位置の直下にあたる底板部に強力な磁力を有するマグネットホルダ台を取り付け、その上部に鋼製巻尺を固定する方法とした。写真 4.2 にタンク内底板部に設置した鋼製巻尺を示す。



写真 4.2 タンク内底板部に設置した鋼製巻尺

① レベル測量による仮 B.M の設置とタンク内底板の標高測定

レベル測量による仮 B.M の設置とタンク内底板の標高測定のイメージを図 4.6 に示す。手順は次のとおりである。

- a. 基準標高の B.M からタンク天端部にあるプラットホームを利用し、仮 B.M を 2 箇所設置する。この時、タンク側板の外側および内側については鋼製巻き尺による直接計測とした。
- b. タンク内に設けた仮 B.M を使用しレベル測量を実施した。浮き屋根仕様はシングルデッキであり、デッキの変形影響を受けないポンツーン上に器械を設置した。
- c. タンク内底板に設置した鋼巻尺の読み値から底板部の標高を算出した。

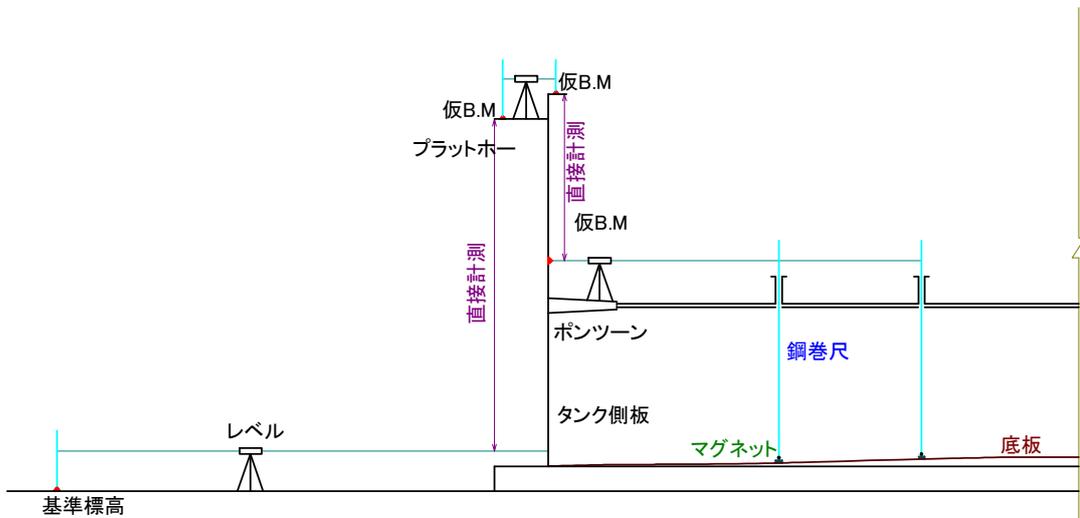


図 4.6 レベル測量による仮 B.M 設置とタンク内底板の標高測定

② レーザーレベルによるタンク内底板の標高測定

レーザーレベルを用いたタンク内底板の標高測定のイメージを図 4.7 に示す。

測定は、①によるレベル測量で設置したタンク内の仮 B.M を利用し、レベル測量器械の代わりにレーザーレベル装置を設置して行った（装置はポンツーン上に設置）。

レーザーレベル装置では、レベル測量時に設定した 2 点の仮 B.M の標高に差がないこと、自動水準器によるレーザー水平ライン上の測定結果がレベル測量と相違ないことを確認した。

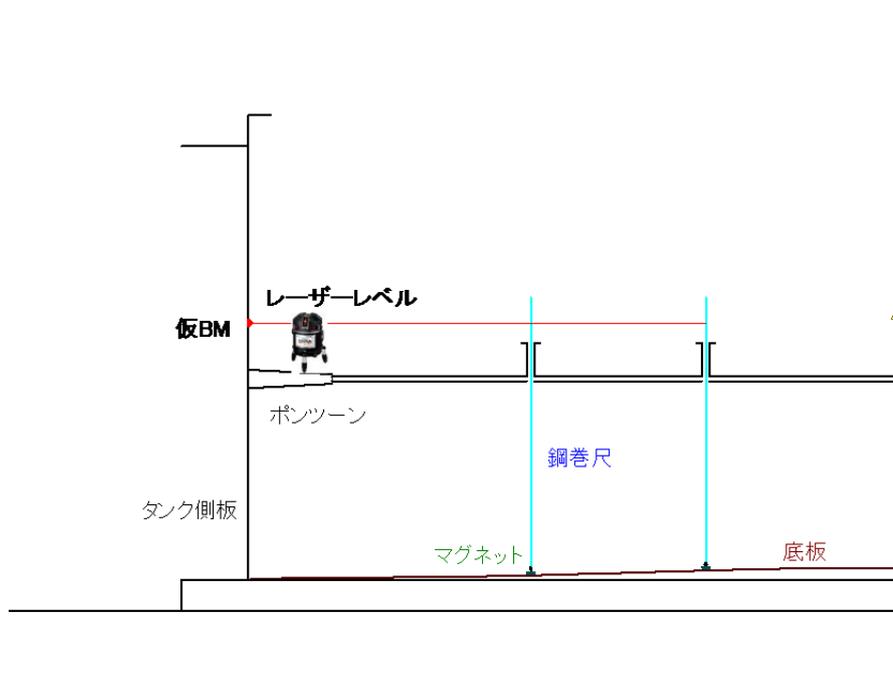


図 4.7 レーザーレベルを用いたタンク内底板の標高量測定

③ タンクスケールによるタンク内底板の沈下量測定

タンクスケールを用いたタンク内底板の沈下量測定のイメージを図 4.8 に示す。

測定は、タンク内底板に設置した鋼巻尺の読み値により、スケール直読位置の標高を算出した。ルーフサポート孔より底板へ降下させたタンクスケールの読み値からタンク内底板の標高を測定した。

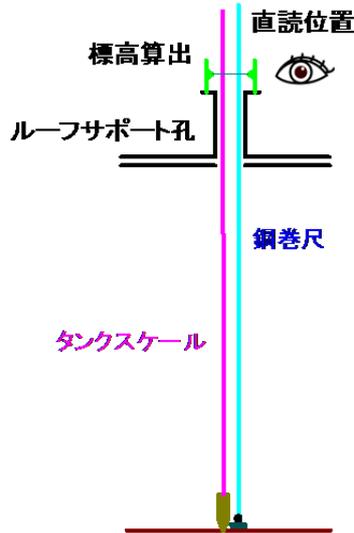


図 4.8 タンクスケールを用いたタンク内底板の沈下量測定方法

(3) 沈下量計測のタイミング

対象タンク内への水張り水位と沈下量計測のタイミングを図 4.9 に示す。

試験時の沈下量計測は、水位を増加させる条件(①～⑥)と水位を減少させる条件(⑥～⑪)の計 11 回実施した。注水時と排水時に計測する水位は同レベルを目処とした。① : 12/9、② : 12/13、③ : 12/15、④ : 12/16、⑤ : 12/17、⑥ : 12/19、⑦ : 12/22、⑧ : 12/24、⑨ : 12/26、⑩ : 12/28、⑪ : 1/6 に実施した。

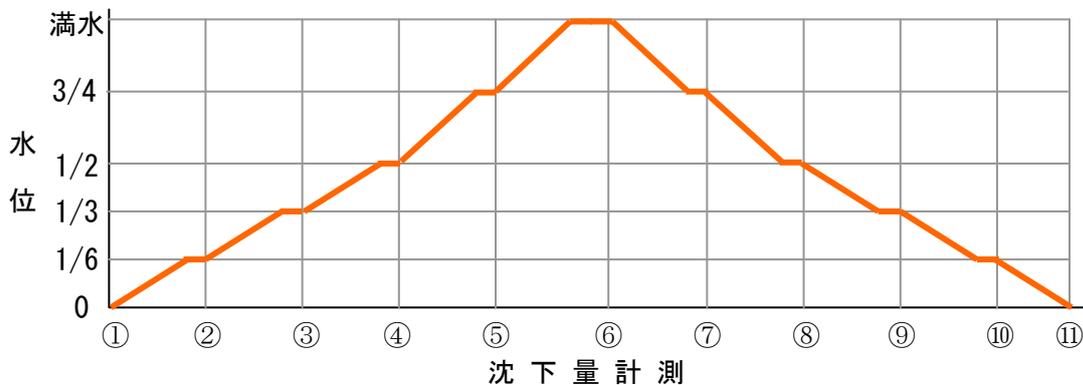


図 4.9 水張り試験水位と沈下量計測のタイミング

4.3.2 計測結果

(1) 側板外周部の沈下量

表 4.3 にタンク側板外周部の標高および沈下量、図 4.10 にタンク側板外周部の標高の変化、図 4.11～4.42 に 水位とタンク側板外周部の沈下量の関係を示す。

表 4.3 タンク側板外周部の標高および沈下量 (沈下量の単位は mm)

基準標高: BM8=4.083m		実測値単位: m																										液量	測定年月日								
種別	測点No.	0	11.25	22.5	33.75	45	56.25	67.5	78.75	90	101.25	112.5	123.75	135	146.25	157.5	168.75	180	191.25	202.5	213.75	225	236.25	247.5	258.75	270	281.25	292.5	303.75	315	326.25	337.5	348.75	BM9	Y9-13		
		1	1'	2	2'	3	3'	4	4'	5	5'	6	6'	7	7'	8	8'	9	9'	10	10'	11	11'	12	12'	13	13'	14	14'	15	15'	16	16'				
第1回	実測ELVE	4.955	4.947	4.944	4.941	4.941	4.940	4.941	4.942	4.942	4.946	4.939	4.938	4.935	4.935	4.928	4.929	4.941	4.938	4.943	4.943	4.939	4.931	4.936	4.944	4.950	4.959	4.963	4.968	4.971	4.970	4.967	4.969	4.959	4.275	4.490	
	前回差																																				
	累計沈下量	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
第2回	実測ELVE	4.951	4.946	4.942	4.938	4.939	4.939	4.941	4.941	4.943	4.945	4.938	4.936	4.935	4.934	4.931	4.929	4.941	4.937	4.942	4.936	4.931	4.936	4.943	4.951	4.960	4.964	4.967	4.970	4.970	4.968	4.965	4.959	4.275	4.490		
	前回差	-4	-1	-2	-3	-2	-1	0	-1	+1	-1	-1	-2	+0	-1	+3	0	0	-1	-1	-3	0	0	-1	+1	+1	+1	-1	-1	+0	+1	-4	+0	0	0		
	累計沈下量	-4	-1	-2	-3	-2	-1	0	-1	+1	-1	-1	-2	+0	-1	+3	0	0	-1	-1	-3	0	0	-1	+1	+1	+1	-1	-1	+0	+1	-4	+0	0	0		
第3回	実測ELVE	4.950	4.945	4.941	4.937	4.940	4.939	4.941	4.941	4.942	4.943	4.936	4.935	4.933	4.933	4.930	4.926	4.939	4.936	4.940	4.936	4.929	4.934	4.942	4.949	4.959	4.961	4.965	4.969	4.967	4.966	4.965	4.957	4.275	4.490		
	前回差	-1	-1	-1	-1	+1	0	0	0	-1	-2	-2	-1	-2	-1	-3	-2	-1	-2	-1	-2	0	-2	-2	-1	-2	-1	-3	-2	-1	-3	-2	0	-2	0	0	
	累計沈下量	-5	-2	-3	-4	-1	-1	0	-1	0	-3	-3	-3	-2	-2	+2	-3	-2	-2	-3	-3	-2	-2	-2	-1	+0	-2	-3	-2	-3	-1	-4	-2	0	0		
第4回	実測ELVE	4.948	4.942	4.939	4.935	4.937	4.935	4.938	4.937	4.939	4.941	4.934	4.932	4.931	4.931	4.927	4.924	4.936	4.934	4.938	4.933	4.926	4.932	4.939	4.946	4.955	4.959	4.963	4.967	4.965	4.964	4.962	4.955	4.275	4.490		
	前回差	-2	-3	-2	-2	-3	-4	-3	-4	-3	-2	-2	-3	-2	-2	-3	-2	-3	-2	-2	-3	-3	-2	-3	-3	-4	-2	-2	-2	-2	-3	-2	0	0	0		
	累計沈下量	-7	-5	-5	-6	-4	-5	-3	-5	-3	-5	-5	-6	-4	-4	-1	-5	-5	-4	-4	-5	-4	-5	-4	-5	-4	-4	-5	-4	-5	-3	-4	0	0	0		
第5回	実測ELVE	4.945	4.939	4.936	4.932	4.933	4.931	4.935	4.933	4.933	4.935	4.927	4.925	4.924	4.923	4.919	4.916	4.929	4.928	4.931	4.927	4.919	4.924	4.932	4.939	4.948	4.952	4.955	4.959	4.958	4.958	4.956	4.949	4.275	4.490		
	前回差	-3	-3	-3	-3	-4	-4	-3	-4	-6	-6	-7	-7	-7	-8	-8	-8	-7	-6	-7	-6	-7	-8	-7	-7	-5	-5	-4	-5	-3	-4	-3	-3	0	0		
	累計沈下量	-10	-8	-8	-9	-8	-9	-6	-9	-9	-11	-12	-13	-11	-12	-9	-13	-12	-10	-12	-12	-12	-12	-12	-11	-9	-9	-9	-9	-8	-7	-10	-7	0	0		
第6回	実測ELVE	4.940	4.936	4.932	4.928	4.928	4.929	4.930	4.930	4.931	4.933	4.926	4.925	4.923	4.922	4.921	4.916	4.928	4.926	4.929	4.927	4.919	4.924	4.932	4.939	4.948	4.952	4.955	4.959	4.958	4.958	4.956	4.950	4.275	4.490		
	前回差	-5	-3	-4	-4	-5	-2	-5	-3	-2	-1	0	-1	-1	-1	+2	0	-1	-2	-2	0	0	0	0	-2	-2	-4	-3	-4	-3	-4	-3	-3	0	0		
	累計沈下量	-15	-11	-12	-13	-13	-11	-11	-12	-11	-13	-13	-13	-12	-13	-7	-13	-13	-12	-14	-12	-12	-12	-12	-11	-11	-11	-13	-12	-12	-10	-13	-10	0	0		
第7回	実測ELVE	4.940	4.935	4.932	4.927	4.929	4.928	4.930	4.929	4.929	4.931	4.924	4.923	4.920	4.920	4.917	4.914	4.926	4.925	4.929	4.924	4.918	4.921	4.930	4.937	4.946	4.952	4.957	4.958	4.959	4.958	4.956	4.950	4.275	4.490		
	前回差	0	-1	0	-1	+1	-1	0	-1	-2	-2	-2	-2	-3	-2	-4	-2	-2	-1	0	-3	-1	-3	-2	-2	0	+2	-1	+1	+1	0	+1	0	0			
	累計沈下量	-15	-12	-12	-14	-12	-12	-11	-13	-13	-15	-15	-15	-15	-15	-11	-15	-15	-13	-14	-15	-13	-15	-14	-13	-13	-11	-11	-13	-11	-9	-13	-9	0	0		
第8回	実測ELVE	4.945	4.940	4.938	4.935	4.934	4.933	4.935	4.935	4.935	4.938	4.931	4.930	4.928	4.927	4.925	4.920	4.933	4.932	4.935	4.930	4.924	4.928	4.938	4.944	4.953	4.956	4.961	4.965	4.964	4.963	4.960	4.954	4.275	4.490		
	前回差	+5	+5	+6	+8	+5	+5	+5	+6	+6	+7	+7	+7	+8	+7	+8	+6	+7	+7	+6	+6	+7	+8	+7	+7	+4	+4	+7	+5	+5	+4	+4	0	0	0		
	累計沈下量	-10	-7	-6	-6	-7	-7	-6	-7	-7	-8	-8	-8	-7	-8	-3	-9	-8	-6	-8	-9	-7	-8	-6	-6	-6	-7	-7	-6	-6	-4	-9	-5	0	0		
第9回	実測ELVE	4.949	4.943	4.940	4.936	4.938	4.937	4.938	4.938	4.938	4.940	4.933	4.932	4.930	4.930	4.927	4.924	4.937	4.935	4.938	4.934	4.928	4.933	4.941	4.947	4.956	4.959	4.963	4.968	4.967	4.965	4.964	4.957	4.275	4.490		
	前回差	+4	+3	+2	+1	+4	+4	+3	+3	+3	+2	+2	+2	+3	+2	+4	+4	+3	+3	+3	+4	+4	+5	+3	+3	+3	+2	+3	+3	+2	+4	+3	0	0	0		
	累計沈下量	-6	-4	-4	-5	-3	-3	-3	-4	-4	-6	-6	-6	-5	-5	-1	-5	-4	-3	-3	-5	-4	-3	-3	-3	-3	-4	-5	-3	-3	-2	-5	-2	0	0		
第10回	実測ELVE	4.948	4.942	4.939	4.936	4.937	4.936	4.939	4.936	4.940	4.943	4.935	4.934	4.931	4.931	4.929	4.926	4.938	4.935	4.940	4.937	4.930	4.935	4.943	4.949	4.958	4.959	4.964	4.968	4.967	4.966	4.962	4.955	4.275	4.490		
	前回差	-1	-1	-1	0	-1	-1	+1	-2	+2	+3	+2	+2	+1	+1	+2	+2	+1	0	+2	+3	+2	+2	+2	+2	+2	0	+1	0	0	+1	-2	-2	0	0		
	累計沈下量	-7	-5	-5	-5	-4	-4	-2	-6	-2	-3	-4	-4	-4	-4	+1	-3	-3	-3	-3	-2	-1	-1	-1	-1	-1	-4	-4	-3	-3	-1	-7	-4	0	0		
第11回	実測ELVE	4.955	4.950	4.946	4.943	4.943	4.943	4.944	4.943	4.945	4.947	4.940	4.939	4.937	4.936	4.934	4.931	4.944	4.942	4.946	4.941	4.935	4.939	4.947	4.953	4.961	4.967	4.970	4.973	4.973	4.971	4.969	4.963	4.275	4.490		
	前回差	+7	+8	+7	+7	+6	+7	+5	+7	+5	+4	+5	+5	+6	+5	+5	+5	+6	+7	+6	+4	+5	+4	+4	+4	+3	+8	+6	+5	+6	+5	+7	+8	0	0		
	累計沈下量	0	+3	+2	+2	+2	+3	+3	+1	+3	+1	+1	+1	+1	+2	+1	+6	+2	+3	+4	+3	+2	+4	+3	+3	+3	+2	+4	+2	+2	+3	+4	0	+4	0	0	

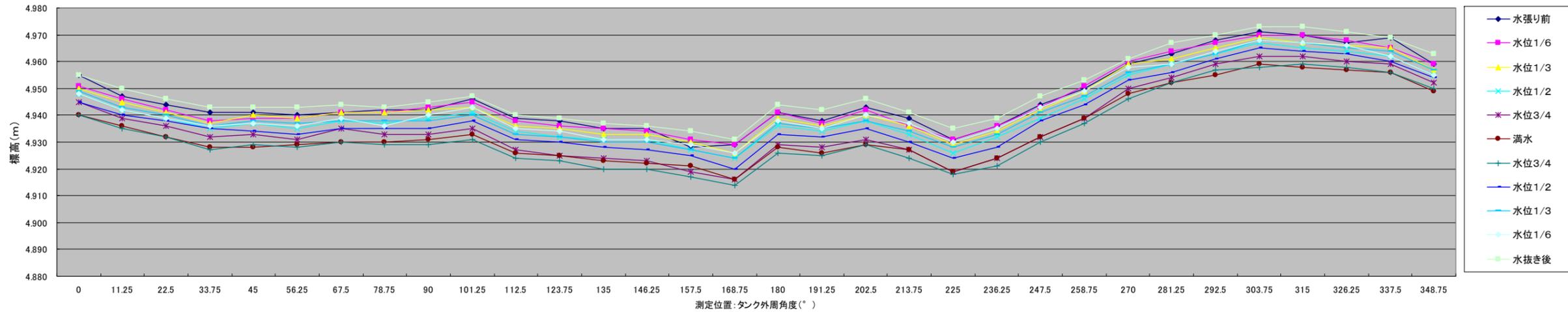


図 4.10 タンク側板外周部の標高の変化

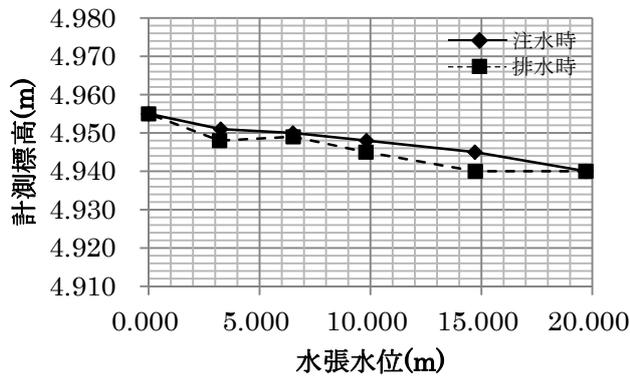


図 4.11 水位－標高の関係(「1」)

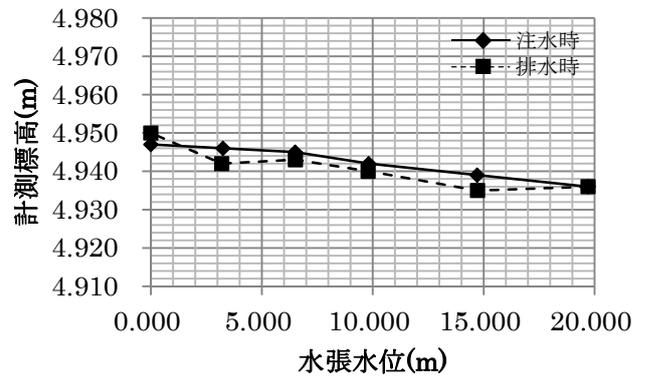


図 4.12 水位－標高の関係(「1'」)

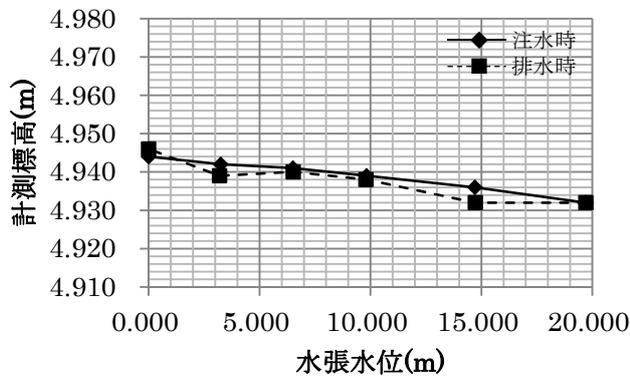


図 4.13 水位－標高の関係(「2」)

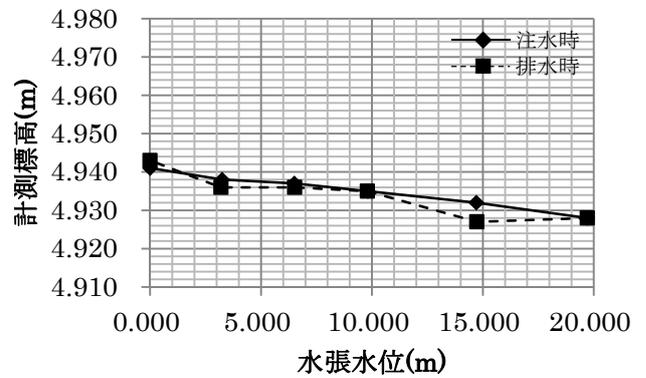


図 4.14 水位－標高の関係(「2'」)

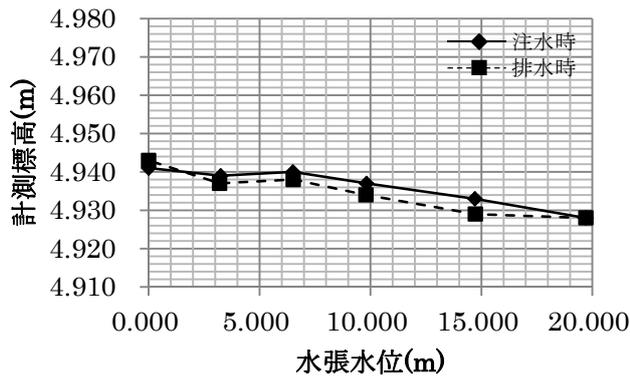


図 4.15 水位－標高の関係(「3」)

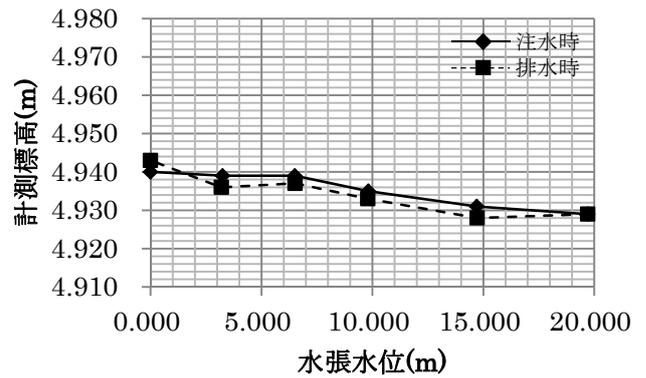


図 4.16 水位－標高の関係(「3'」)

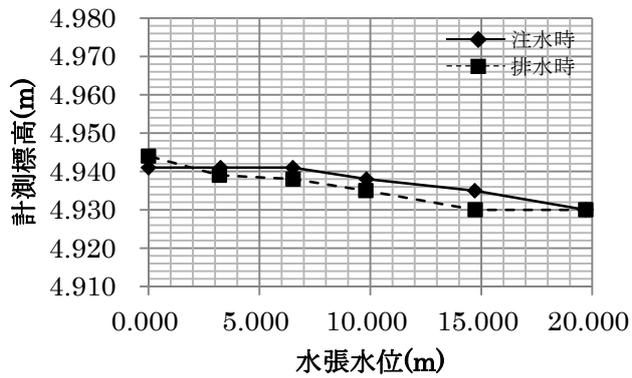


図 4.17 水位－標高の関係(「4」)

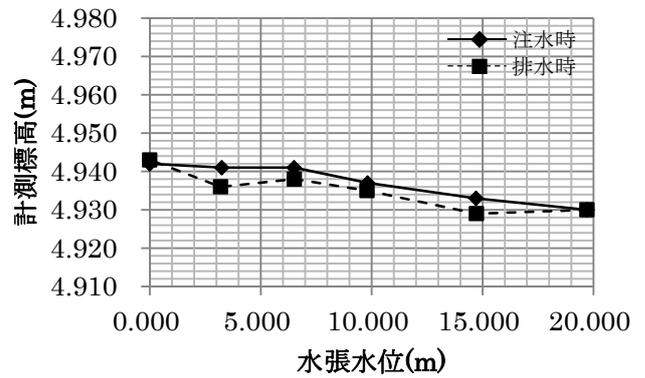


図 4.18 水位－標高の関係(「4'」)

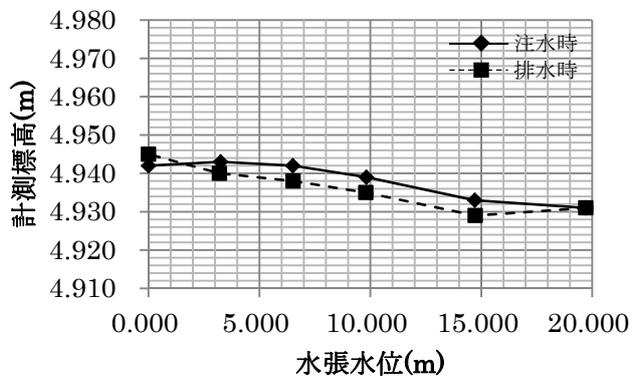


図 4.19 水位－標高の関係(「5」)

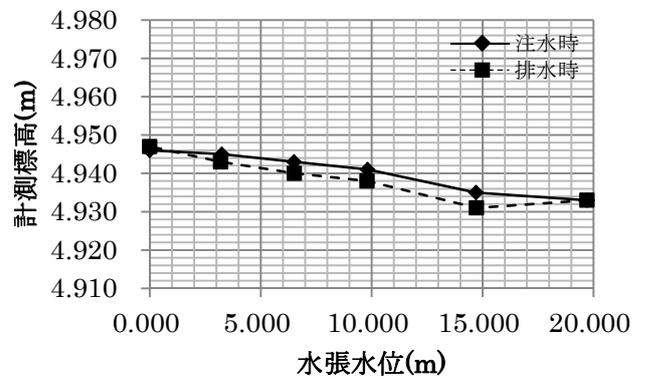


図 4.20 水位－標高の関係(「5'」)

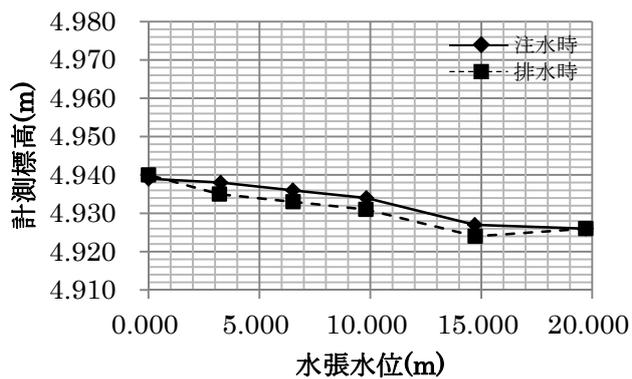


図 4.21 水位－標高の関係(「6」)

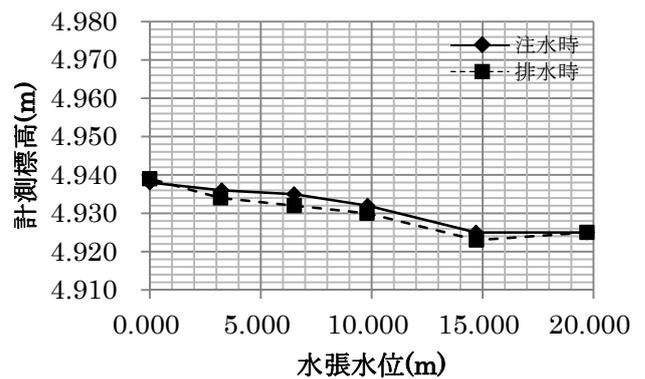


図 4.22 水位－標高の関係(「6'」)

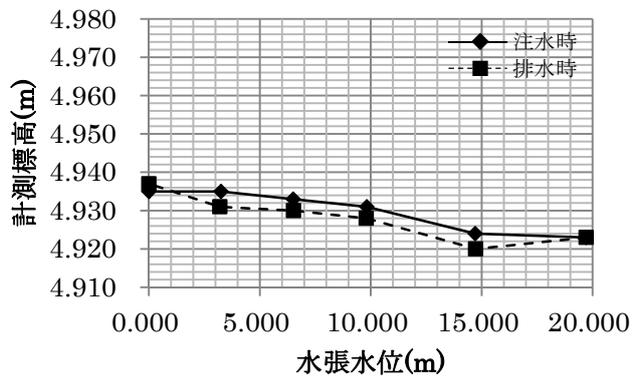


図 4.23 水位－標高の関係(「7」)

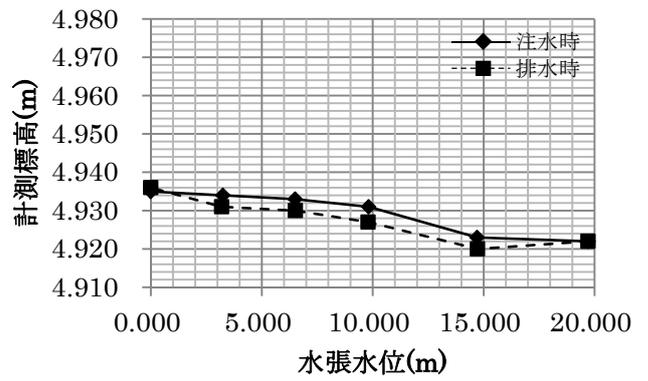


図 4.24 水位－標高の関係(「7'」)

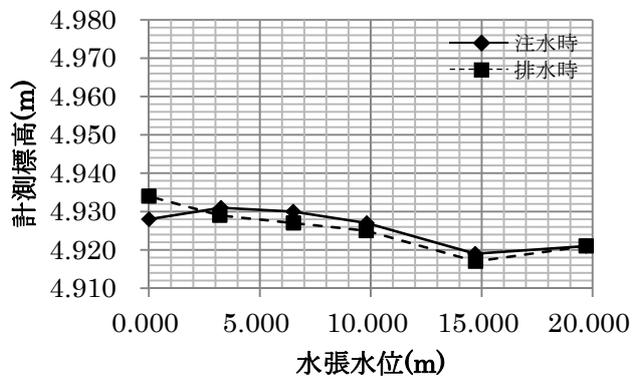


図 4.25 水位－標高の関係(「8」)

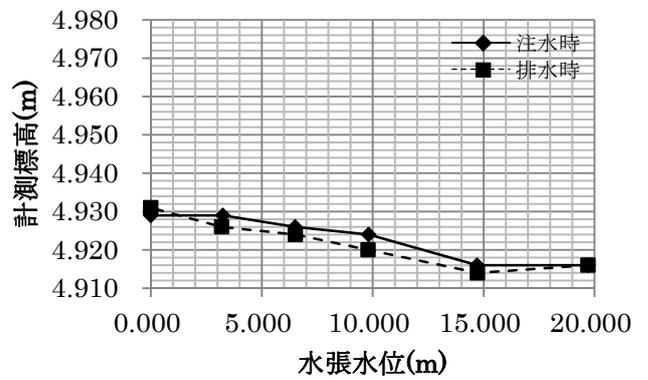


図 4.26 水位－標高の関係(「8'」)

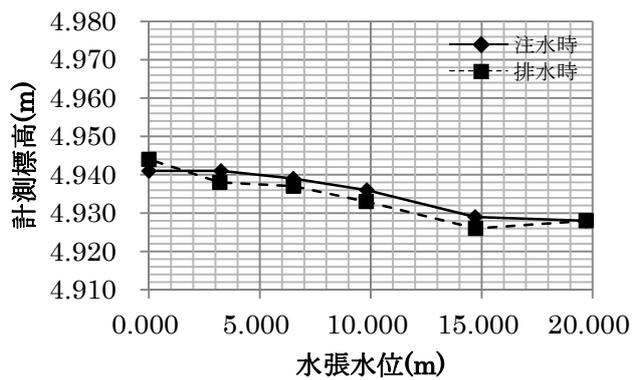


図 4.27 水位－標高の関係(「9」)

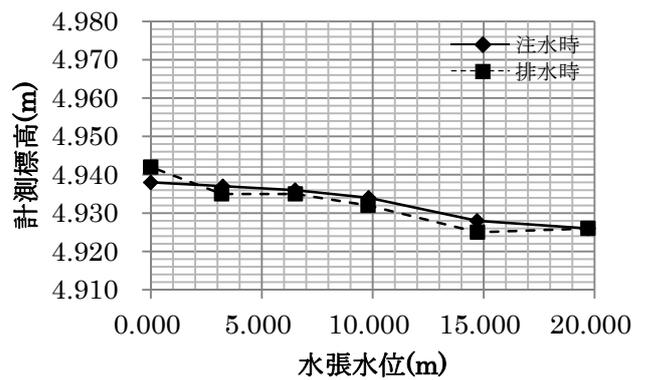


図 4.28 水位－標高の関係(「9'」)

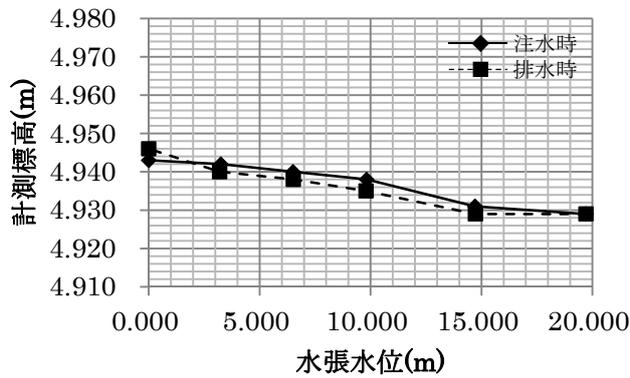


図 4.29 水位－標高の関係(「10J」)

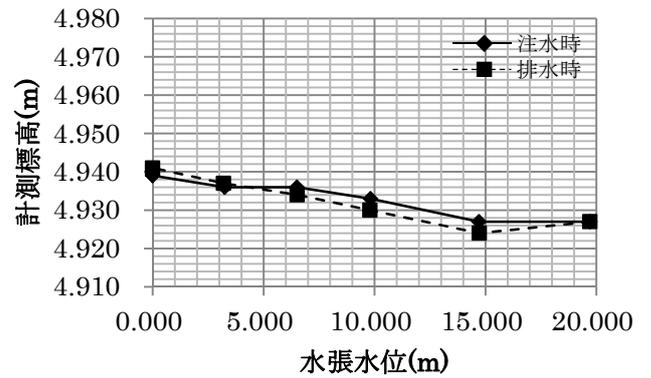


図 4.30 水位－標高の関係(「10\'」)

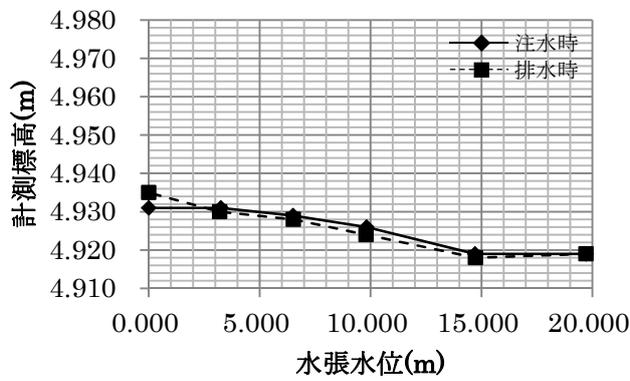


図 4.31 水位－標高の関係(「11J」)

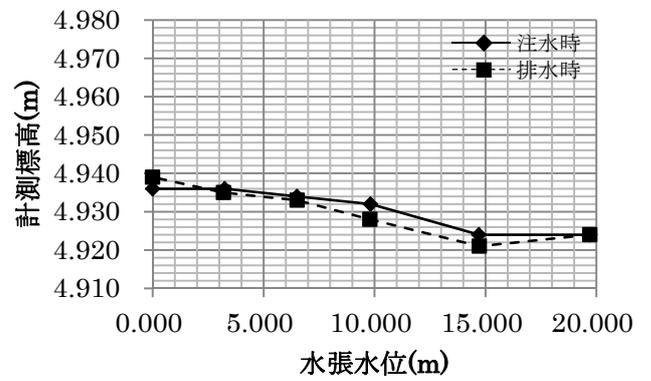


図 4.32 水位－標高の関係(「11\'」)

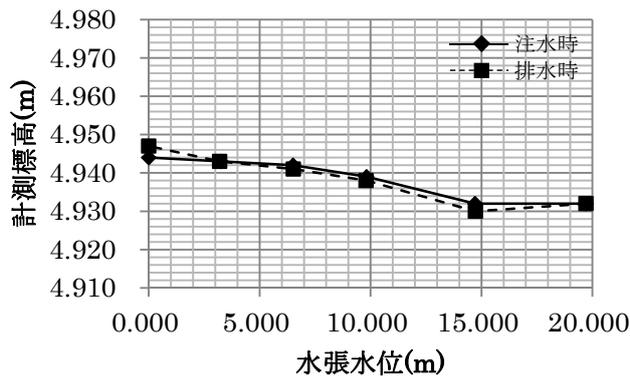


図 4.33 水位－標高の関係(「12J」)

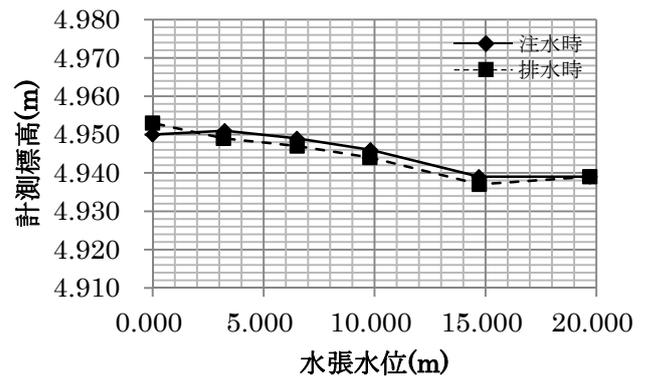


図 4.34 水位－標高の関係(「12\'」)

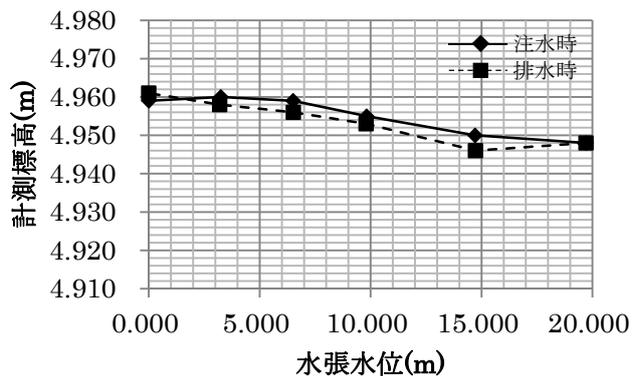


図 4.35 水位－標高の関係(「13」)

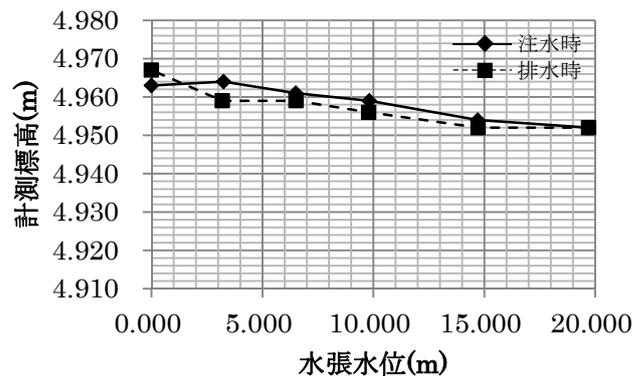


図 4.36 水位－標高の関係(「13'」)

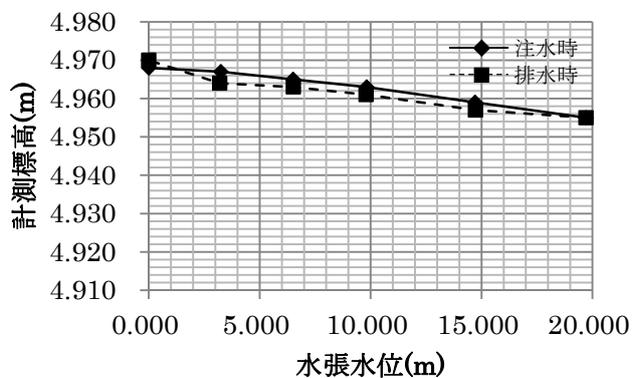


図 4.37 水位－標高の関係(「14」)

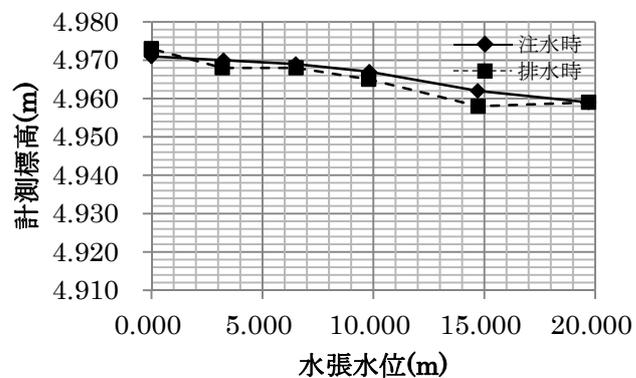


図 4.38 水位－標高の関係(「14'」)

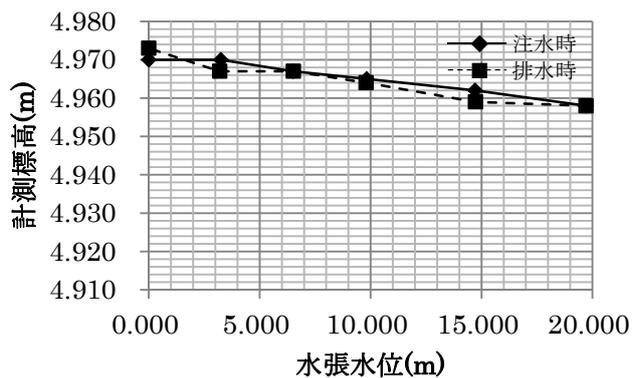


図 4.39 水位－標高の関係(「15」)

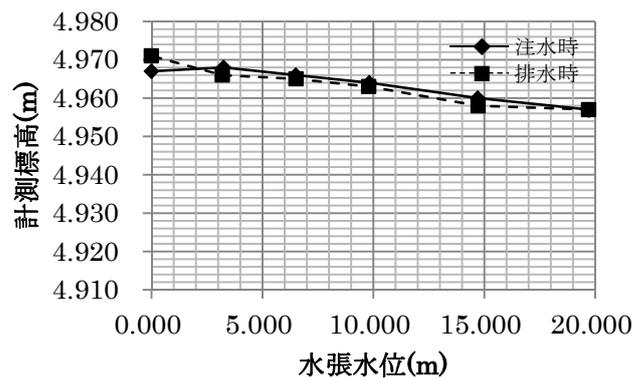


図 4.40 水位－標高の関係(「15'」)

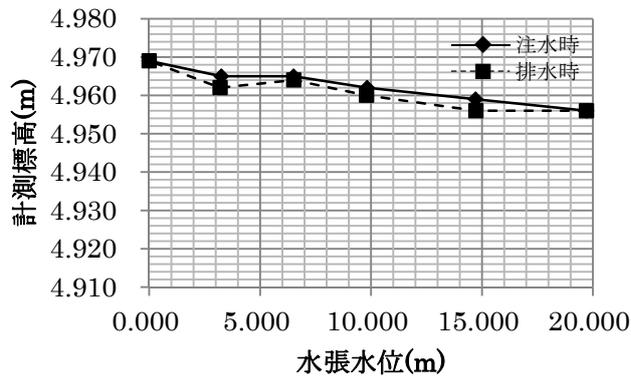


図 4.41 水位－標高の関係(「16J」)

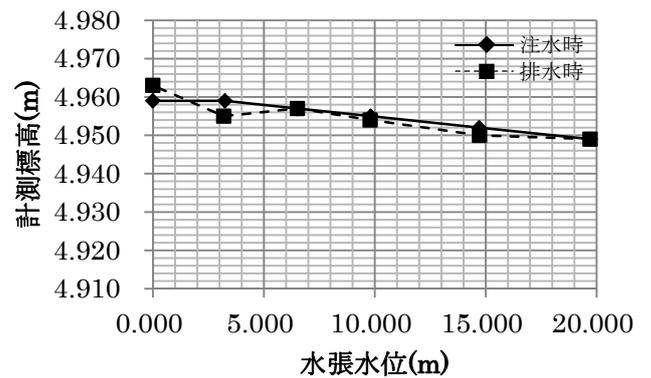


図 4.42 水位－標高の関係(「16I」)

水張試験前の空液時(第1回)におけるタンク側板外周部の標高測定の結果に sin カーブを重ね合わせたものを図 4.43 に示す。当該タンクは概ね一様に傾斜していることが分かる。なお、標高の最大値と最小値の差(不等沈下量)は 43mm であり、タンク内径に対する不等沈下量の割合(不等沈下率)は 1/856 である。

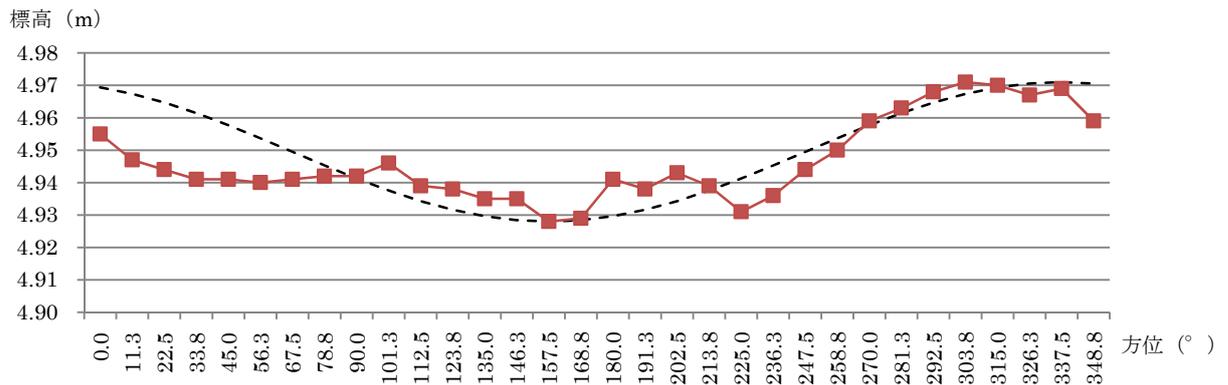


図 4.43 タンク側板外周部の標高(水張試験前)

(2) タンク内底板の沈下量

レベル測量による沈下量計測結果を表 4.4 に、各計測点の水位と沈下量の関係を図 4.44 ~4.53 に示す。

表 4.4 レベル測量による沈下量計測結果(mm)

種別	測点No.	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	液量	測定年月日
第1回	実測ELVE	5083.0	5108.5	5084.5	5075.0	5042.0	5021.5	5019.0	5012.0	5022.0	5024.0		2011/12/9
	前回差	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.000	水張り前
	累計沈下量	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
第2回	実測ELVE	5080.0	5105.5	5072.5	5070.0	5034.0	5018.5	5015.0	5001.0	5014.0	5012.0		2011/12/13
	前回差	-3.0	-3.0	-12.0	-5.0	-8.0	-3.0	-4.0	-11.0	-8.0	-12.0	3.251	水位1/6
	累計沈下量	-3.0	-3.0	-12.0	-5.0	-8.0	-3.0	-4.0	-11.0	-8.0	-12.0		
第3回	実測ELVE	5079.0	5103.5	5069.5	5068.0	5032.0	5016.5	5013.0	5000.0	5011.0	5010.0		2011/12/15
	前回差	-1.0	-2.0	-3.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-1.0	-3.0	-2.0	6.505	水位1/3
	累計沈下量	-4.0	-5.0	-15.0	-7.0	-10.0	-5.0	-6.0	-6.0	-11.0	-14.0		
第4回	実測ELVE	5066.0	5091.5	5057.5	5056.0	5019.0	5004.5	5000.0	4988.0	5000.0	4998.0		2011/12/16
	前回差	-13.0	-12.0	-12.0	-12.0	-13.0	-12.0	-13.0	-12.0	-11.0	-12.0	9.822	水位1/2
	累計沈下量	-17.0	-17.0	-27.0	-19.0	-23.0	-17.0	-19.0	-24.0	-22.0	-26.0		
第5回	実測ELVE	5063.0	5089.5	5055.5	5053.0	5017.0	5003.5	4998.0	4986.0	4998.0	4997.0		2011/12/17
	前回差	-3.0	-2.0	-2.0	-3.0	-2.0	-1.0	-2.0	-2.0	-2.0	-1.0	14.709	水位3/4
	累計沈下量	-20.0	-19.0	-29.0	-22.0	-25.0	-18.0	-21.0	-26.0	-24.0	-27.0		
第6回	実測ELVE	5051.0	5076.5	5044.5	5041.0	5006.0	4990.5	4987.0	4974.0	4987.0	4985.0		2011/12/19
	前回差	-12.0	-13.0	-11.0	-12.0	-11.0	-13.0	-11.0	-12.0	-11.0	-12.0	19.714	満水
	累計沈下量	-32.0	-32.0	-40.0	-34.0	-36.0	-31.0	-32.0	-38.0	-35.0	-39.0		
第7回	実測ELVE	5058.0	5083.5	5048.5	5048.0	5012.0	4997.5	4994.0	4980.0	4994.0	4987.0		2011/12/22
	前回差	7.0	7.0	4.0	7.0	6.0	7.0	7.0	6.0	7.0	2.0	14.731	水位3/4
	累計沈下量	-25.0	-25.0	-36.0	-27.0	-30.0	-24.0	-25.0	-32.0	-28.0	-37.0		
第8回	実測ELVE	5062.0	5087.5	5053.5	5053.0	5015.0	5000.5	4997.0	4984.0	4997.0	4991.0		2011/12/24
	前回差	4.0	4.0	5.0	5.0	3.0	3.0	3.0	4.0	3.0	4.0	9.801	水位1/2
	累計沈下量	-21.0	-21.0	-31.0	-22.0	-27.0	-21.0	-22.0	-28.0	-25.0	-33.0		
第9回	実測ELVE	5068.0	5094.5	5060.5	5059.0	5023.0	5007.5	5003.0	4990.0	5002.0	4998.0		2011/12/26
	前回差	6.0	7.0	7.0	6.0	8.0	7.0	6.0	6.0	5.0	7.0	6.521	水位1/3
	累計沈下量	-15.0	-14.0	-24.0	-16.0	-19.0	-14.0	-16.0	-22.0	-20.0	-26.0		
第10回	実測ELVE	5068.0	5095.5	5060.5	5059.0	5023.0	5007.5	5003.0	4991.0	5003.0	4998.0		2011/12/28
	前回差	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	0.0	3.199	水位1/6
	累計沈下量	-15.0	-13.0	-24.0	-16.0	-19.0	-14.0	-16.0	-21.0	-19.0	-26.0		
第11回	実測ELVE	5083.0	5107.5	5084.5	5074.0	5042.0	5022.5	5018.0	5009.0	5022.0	5023.0		2012/1/6
	前回差	15.0	12.0	24.0	15.0	19.0	15.0	15.0	18.0	19.0	25.0	0.000	水抜き後
	累計沈下量	0.0	-1.0	0.0	-1.0	0.0	1.0	-1.0	-3.0	0.0	-1.0		

※測点J・・・第7回～第10回の計測でタンクスケールを使用

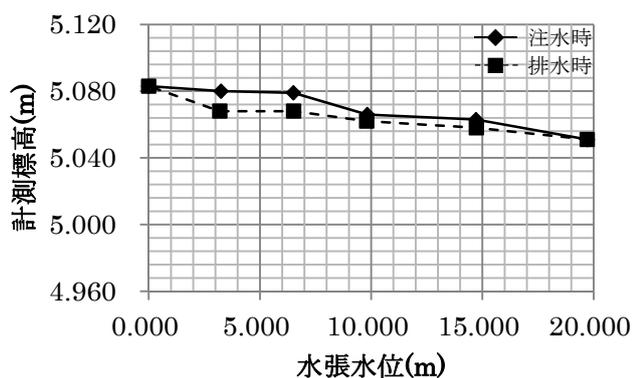


図 4.44 水位－標高の関係（「A」）

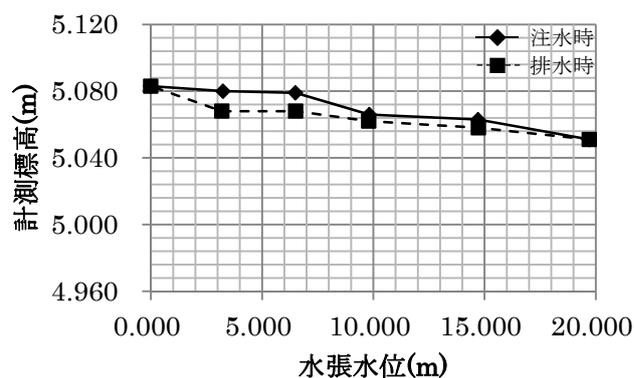


図 4.45 水位－標高の関係（「B」）

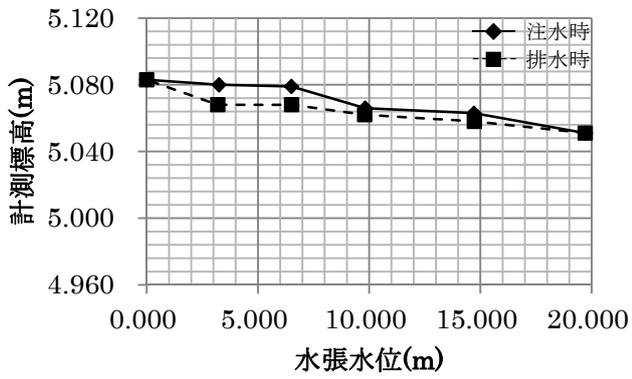


図 4.46 水位－標高の関係（「C」）

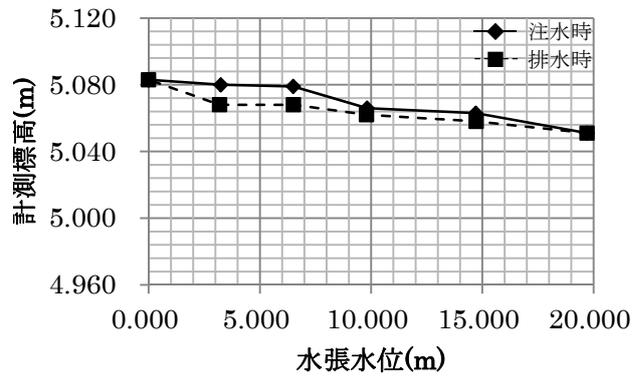


図 4.47 水位－標高の関係（「D」）

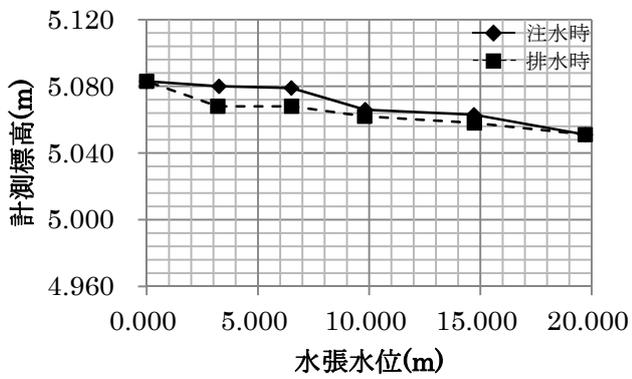


図 4.48 水位－標高の関係（「E」）

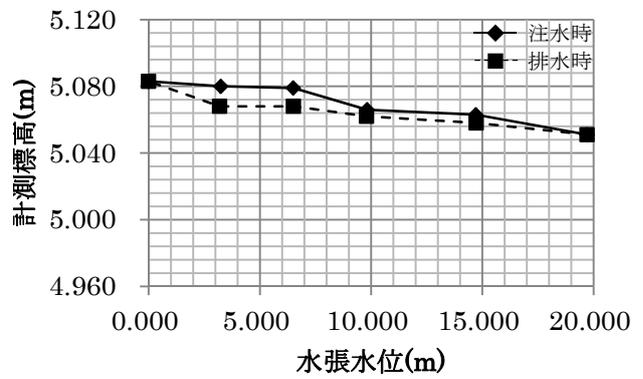


図 4.49 水位－標高の関係（「F」）

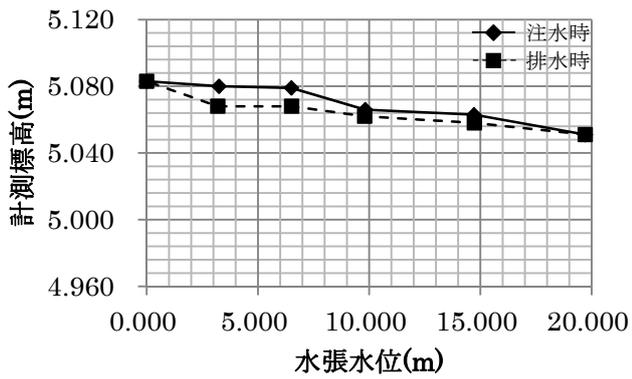


図 4.50 水位－標高の関係（「G」）

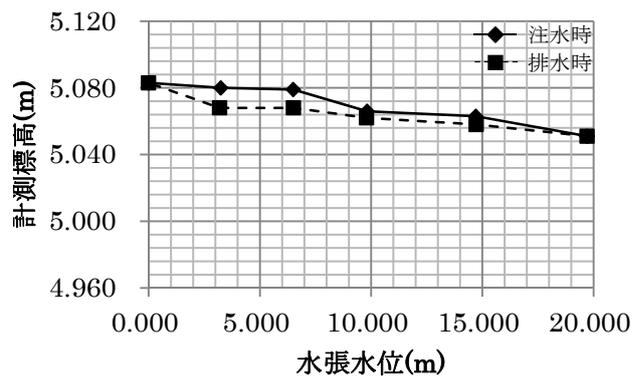


図 4.51 水位－標高の関係（「H」）

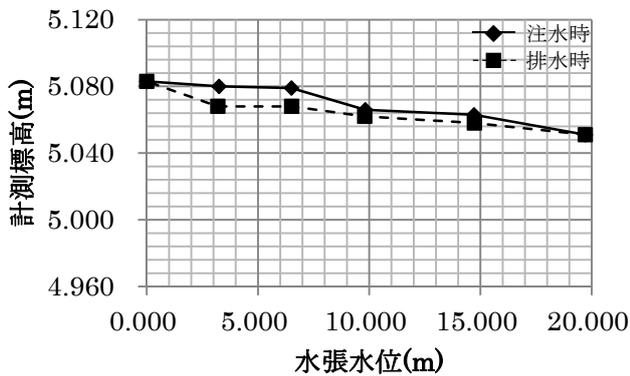


図 4.52 水位－標高の関係（「I」）

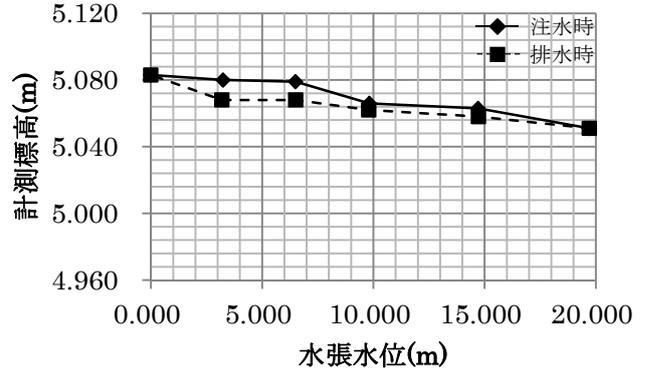


図 4.53 水位－標高の関係（「J」）

3種類の方法による沈下量の比較を表 4.5、標高の比較を表 4.6 に示す。

表 4.5 3種類の方法による沈下量の比較(mm)

	種別 測点No.	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	液量	測定年月日
第1回	①レベル測量	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	2011/12/9
	②レーザーレベル	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		水張り前
	③タンクスケール	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
第2回	①レベル測量	-3.0	-3.0	-12.0	-5.0	-8.0	-3.0	-4.0	-11.0	-8.0	-12.0		2011/12/13
	②レーザーレベル	-2.0	-3.0	-12.0	-6.0	-8.0	-2.0	-2.0	-10.0	-8.0	-10.5	3.251	水位1/6
	③タンクスケール	-2.0	-4.0	-10.0	-6.0	-6.0	-2.0	0.0	-10.0	-8.0	-10.5		
第3回	①レベル測量	-4.0	-5.0	-15.0	-7.0	-10.0	-5.0	-6.0	-12.0	-11.0	-14.0		2011/12/15
	②レーザーレベル	-2.0	-4.0	-15.0	-7.0	-9.0	-4.0	-3.0	-11.0	-11.0	-12.0	6.505	水位1/3
	③タンクスケール	-1.0	-4.0	-10.0	-7.0	-6.0	-6.5	-1.0	-11.0	-12.0	-11.0		
第4回	①レベル測量	-17.0	-17.0	-27.0	-19.0	-23.0	-17.0	-19.0	-24.0	-22.0	-26.0		2011/12/16
	②レーザーレベル	-15.0	-17.0	-26.0	-21.0	-22.0	-16.0	-16.0	-23.0	-23.0	-25.0	9.822	水位1/2
	③タンクスケール	-15.0	-15.0	-24.0	-21.0	-20.0	-18.0	-13.0	-23.0	-24.0	-22.0		
第5回	①レベル測量	-20.0	-19.0	-29.0	-22.0	-25.0	-18.0	-21.0	-26.0	-24.0	-27.0		2011/12/17
	②レーザーレベル	-20.0	-21.0	-29.0	-24.0	-26.0	-19.0	-20.0	-27.0	-25.0	-26.0	14.709	水位3/4
	③タンクスケール	-20.0	-19.0	-24.0	-22.0	-23.0	-21.0	-19.0	-26.0	-27.0	-26.0		
第6回	①レベル測量	-32.0	-32.0	-40.0	-34.0	-36.0	-31.0	-32.0	-38.0	-35.0	-39.0		2011/12/19
	②レーザーレベル	-30.0	-32.0	-39.0	-35.0	-37.0	-29.0	-30.0	-36.0	-35.0	-37.0	19.714	満水
	③タンクスケール	-30.0	-31.0	-36.0	-31.0	-34.0	-29.0	-27.0	-36.0	-36.0	-36.0		
第7回	①レベル測量	-25.0	-25.0	-36.0	-27.0	-30.0	-24.0	-25.0	-32.0	-28.0	-37.0		2011/12/22
	②レーザーレベル	-27.0	-28.0	-36.0	-32.0	-34.0	-26.0	-26.0	-34.0	-31.0	-35.0	14.731	水位3/4
	③タンクスケール	-29.0	-26.0	-33.0	-31.0	-32.0	-26.0	-26.0	-34.0	-31.0	-32.0		
第8回	①レベル測量	-21.0	-21.0	-31.0	-22.0	-27.0	-21.0	-22.0	-28.0	-25.0	-33.0		2011/12/24
	②レーザーレベル	-21.0	-22.0	-31.0	-25.0	-28.0	-20.0	-22.0	-28.0	-26.0	-31.0	9.801	水位1/2
	③タンクスケール	-21.0	-20.0	-27.0	-25.0	-28.0	-19.0	-19.0	-28.0	-29.0	-28.0		
第9回	①レベル測量	-15.0	-14.0	-24.0	-16.0	-19.0	-14.0	-16.0	-22.0	-20.0	-26.0		2011/12/26
	②レーザーレベル	-13.0	-17.0	-25.0	-18.0	-20.0	-15.0	-15.0	-22.0	-23.0	-24.0	6.521	水位1/3
	③タンクスケール	-12.0	-16.0	-21.0	-15.0	-19.0	-17.0	-16.0	-21.0	-25.0	-21.0		
第10回	①レベル測量	-15.0	-13.0	-24.0	-16.0	-19.0	-14.0	-16.0	-21.0	-19.0	-26.0		2011/12/28
	②レーザーレベル	-13.0	-13.0	-22.0	-17.0	-20.0	-12.0	-15.0	-20.0	-19.0	-24.0	3.199	水位1/6
	③タンクスケール	-15.0	-12.0	-19.0	-17.0	-18.0	-13.0	-15.0	-18.0	-18.0	-21.0		
第11回	①レベル測量	0.0	-1.0	0.0	-1.0	0.0	1.0	-1.0	-3.0	0.0	-1.0		2012/1/6
	②レーザーレベル	3.0	-1.0	1.0	-2.0	-1.0	2.0	-1.0	-1.0	2.0	1.0	0.000	水抜き後
	③タンクスケール	2.0	0.0	4.0	0.0	0.0	-1.0	-1.0	0.0	1.0	2.0		

※測点J・・・第7回～第10回の計測でタンクスケールを使用

表 4.6 3種類の方法による標高の比較(mm)

	種別 測点No.	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	液量	測定年月日
第1回	①レベル測量	5083.0	5108.5	5084.5	5075.0	5042.0	5021.5	5019.0	5012.0	5022.0	5024.0		2011/12/9
	②レーザーレベル	5081.0	5109.5	5083.5	5076.0	5042.0	5020.5	5017.0	5011.0	5022.0	5022.0	0.000	水張り前
	③タンクスケール	5079.0	5108.0	5080.0	5073.0	5038.0	5021.0	5013.0	5009.0	5022.0	5019.0		
第2回	①レベル測量	5080.0	5105.5	5072.5	5070.0	5034.0	5018.5	5015.0	5001.0	5014.0	5012.0		2011/12/13
	②レーザーレベル	5079.0	5106.5	5071.5	5070.0	5034.0	5018.5	5015.0	5001.0	5014.0	5011.5	3.251	水位1/6
	③タンクスケール	5077.0	5104.0	5070.0	5067.0	5032.0	5019.0	5013.0	4999.0	5014.0	5008.5		水温:14.9°C
第3回	①レベル測量	5079.0	5103.5	5069.5	5068.0	5032.0	5016.5	5013.0	5000.0	5011.0	5010.0		2011/12/15
	②レーザーレベル	5079.0	5105.5	5068.5	5069.0	5033.0	5016.5	5014.0	5000.0	5011.0	5010.0	6.505	水位1/3
	③タンクスケール	5078.0	5104.0	5070.0	5066.0	5032.0	5014.5	5012.0	4998.0	5010.0	5008.0		水温:14.1°C
第4回	①レベル測量	5066.0	5091.5	5057.5	5056.0	5019.0	5004.5	5000.0	4988.0	5000.0	4998.0		2011/12/16
	②レーザーレベル	5066.0	5092.5	5057.5	5055.0	5020.0	5004.5	5001.0	4988.0	4999.0	4997.0	9.822	水位1/2
	③タンクスケール	5064.0	5093.0	5056.0	5052.0	5018.0	5003.0	5000.0	4986.0	4998.0	4997.0		水温:14.7°C
第5回	①レベル測量	5063.0	5089.5	5055.5	5053.0	5017.0	5003.5	4998.0	4986.0	4998.0	4997.0		2011/12/17
	②レーザーレベル	5061.0	5088.5	5054.5	5052.0	5016.0	5001.5	4997.0	4984.0	4997.0	4996.0	14.709	水位3/4
	③タンクスケール	5059.0	5089.0	5056.0	5051.0	5015.0	5000.0	4994.0	4983.0	4995.0	4993.0		水温:14.6°C
第6回	①レベル測量	5051.0	5076.5	5044.5	5041.0	5006.0	4990.5	4987.0	4974.0	4987.0	4985.0		2011/12/19
	②レーザーレベル	5051.0	5077.5	5044.5	5041.0	5005.0	4991.5	4987.0	4975.0	4987.0	4985.0	19.714	満水
	③タンクスケール	5049.0	5077.0	5044.0	5042.0	5004.0	4992.0	4986.0	4973.0	4986.0	4983.0		水温:15.7°C
第7回	①レベル測量	5058.0	5083.5	5048.5	5048.0	5012.0	4997.5	4994.0	4980.0	4994.0	4987.0		2011/12/22
	②レーザーレベル	5054.0	5081.5	5047.5	5044.0	5008.0	4994.5	4991.0	4977.0	4991.0	4987.0	14.731	水位3/4
	③タンクスケール	5050.0	5082.0	5047.0	5042.0	5006.0	4995.0	4987.0	4975.0	4991.0	4987.0		水温:13.6°C
第8回	①レベル測量	5062.0	5087.5	5053.5	5053.0	5015.0	5000.5	4997.0	4984.0	4997.0	4991.0		2011/12/24
	②レーザーレベル	5060.0	5087.5	5052.5	5051.0	5014.0	5000.5	4995.0	4983.0	4996.0	4991.0	9.801	水位1/2
	③タンクスケール	5058.0	5088.0	5053.0	5048.0	5010.0	5002.0	4994.0	4981.0	4993.0	4991.0		水温:12.9°C
第9回	①レベル測量	5068.0	5094.5	5060.5	5059.0	5023.0	5007.5	5003.0	4990.0	5002.0	4998.0		2011/12/26
	②レーザーレベル	5068.0	5092.5	5058.5	5058.0	5022.0	5005.5	5002.0	4989.0	4999.0	4998.0	6.521	水位1/3
	③タンクスケール	5067.0	5092.0	5059.0	5058.0	5019.0	5004.0	4997.0	4988.0	4997.0	4998.0		水温:12.2°C
第10回	①レベル測量	5068.0	5095.5	5060.5	5059.0	5023.0	5007.5	5003.0	4991.0	5003.0	4998.0		2011/12/28
	②レーザーレベル	5068.0	5096.5	5061.5	5059.0	5022.0	5008.5	5002.0	4991.0	5003.0	4998.0	3.199	水位1/6
	③タンクスケール	5064.0	5096.0	5061.0	5056.0	5020.0	5008.0	4998.0	4991.0	5004.0	4998.0		水温:11.5°C
第11回	①レベル測量	5083.0	5107.5	5084.5	5074.0	5042.0	5022.5	5018.0	5009.0	5022.0	5023.0		2012/1/6
	②レーザーレベル	5084.0	5108.5	5084.5	5074.0	5041.0	5022.5	5016.0	5010.0	5024.0	5023.0	0.000	水抜き後
	③タンクスケール	5081.0	5108.0	5084.0	5073.0	5038.0	5020.0	5012.0	5009.0	5023.0	5021.0		

※測点J・・・第7回～第10回の計測でタンクスケールを使用

4.3.3 沈下量に関する検討

以下の検討においては底板の沈下量は「(4) 測定方法による差」以外ではレベル測量によるものを用いた。

(1) 平均沈下量の比較

底板の沈下量，側板外周部の沈下量の平均値を比較し表 4.7 に、水位と底板の沈下量，側板外周部の沈下量の平均値の関係を図 4.54 に示す。

表 4.7 平均沈下量等の比較(mm)

水位		底板	外周
注 水 時	水張り前	0 m	0
	1/6 満水	3.251m	-6.9
	1/3 満水	6.505m	-8.9
	1/2 満水	9.822m	-21.1
	3/4 満水時	14.709m	-23.1
	満水時	19.714m	-34.9
排 水 時	3/4 満水時	14.731m	-28.9
	1/2 満水時	9.801m	-25.1
	1/3 満水時	6.521m	-18.6
	1/6 満水時	3.199m	-18.3
	排水後	0 m	0
			2.5

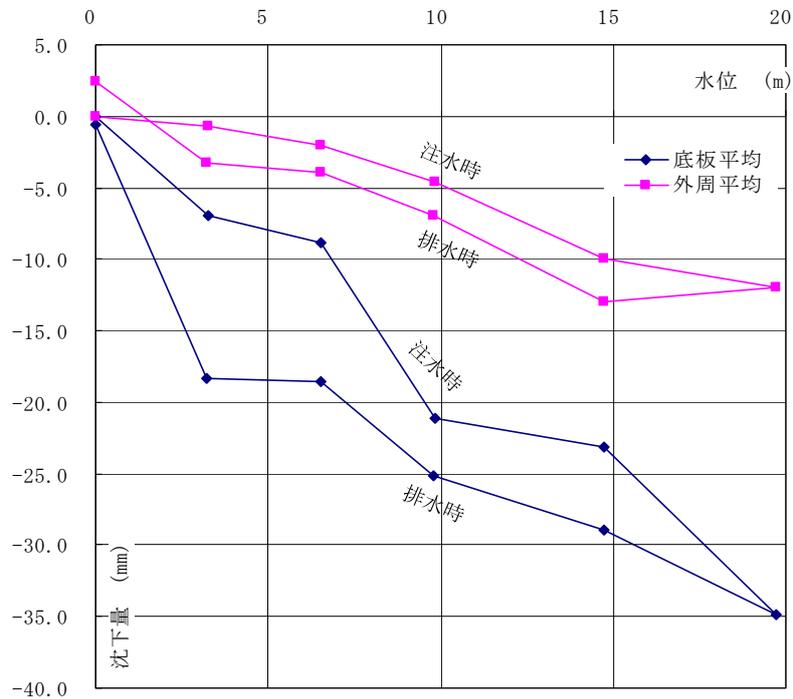


図 4.54 水位と底板の沈下量、側板外周部の沈下量の平均値の関係

底板の沈下量は側板外周部の沈下量より大きく、1/2 満水時で-21.1mm で側板外周部の沈下量の平均値の 4.6 倍、満水時で-34.9mm で側板外周部の沈下量の平均値の 2.9 倍となっている。

(2) 沈下量の分布

屋外貯蔵タンクは円筒形の軸対称であるため、タンク中心からの距離に応じた底板沈下量の分布を図 4.55 に示す。同図に線形近似式をあわせ示す。底板の沈下量の分布はタンク中心からの距離にかかわらず概ね同等である。

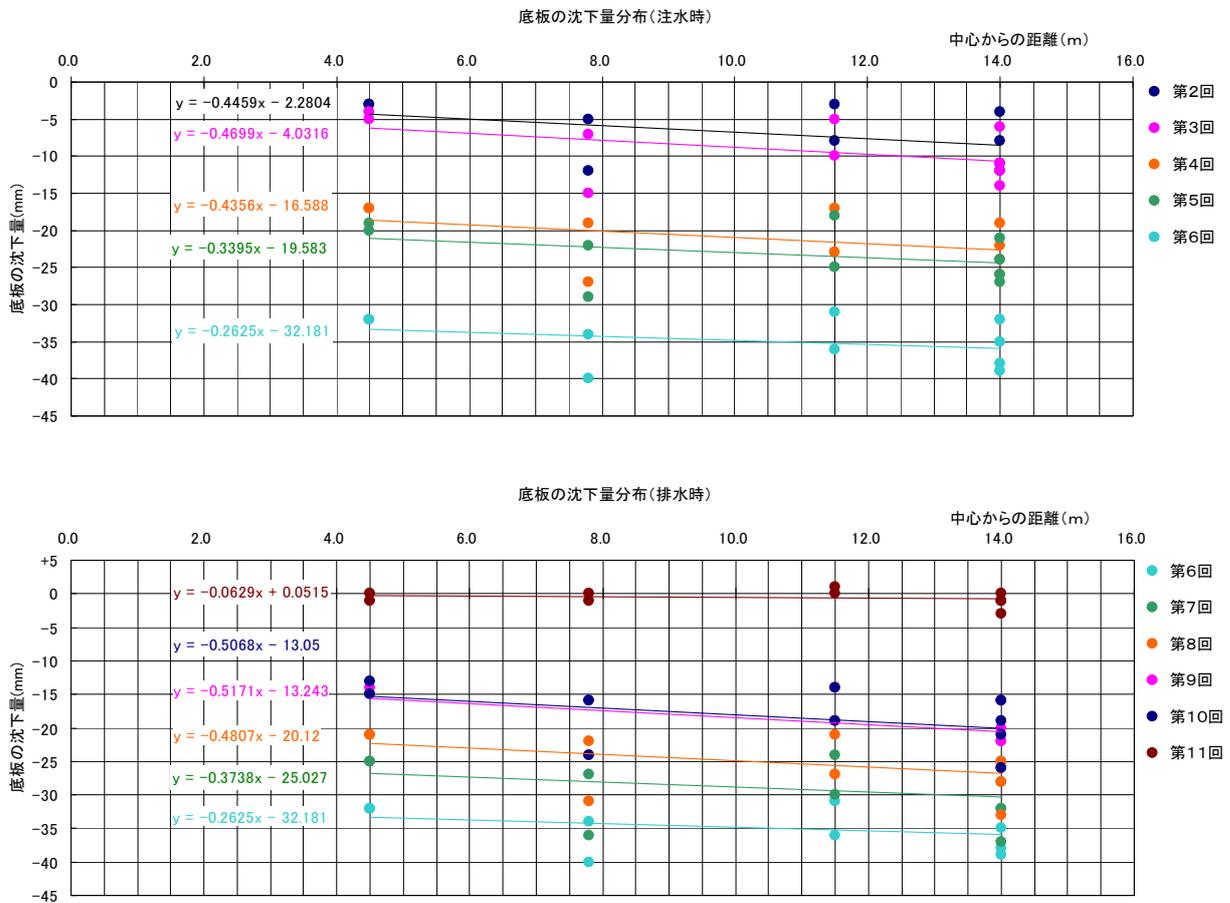


図 4.55 底板の沈下量の分布

(3) 地盤反力係数

地盤反力係数は、計測された地盤沈下量の平均値と側板外周部の沈下量の平均値と底板に加わる水圧より下式で算定する。

$$k_v = \frac{p}{\delta}$$

p : 底板に加わる水圧 = 水の単位重量(9.8 kN/m^3) \times 水位

δ : 平均沈下変形量 = (地盤沈下量の平均値 + 側板外周部の沈下量の平均値) / 2

地盤反力係数は同じ剛性を有する地盤に対しても載荷幅に大きく依存するため、屋外タンク貯蔵所基礎の規制基準や JIS B 8501 (鋼製石油貯槽の構造) に示された K_{30} と比較するためには載荷幅の影響を補正する必要がある。ここでは、道路橋示方書・同解説IV下部構造編に従い、下式により載荷幅の影響を補正した。

$$K_{30} = \frac{k_V}{\left(\frac{B_V}{0.3}\right)^{-0.75}}$$

B_V : タンク内径 (m)

計算結果を表 4.8 に示す。

表 4.8 地盤反力係数

	1/2 満水時	3/4 満水時	満水時
k_V (kN/m ³)	15,163	13,574	11,649
K_{30} (kN/m ³)	5.59×10^5	5.01×10^5	4.30×10^5

比較のために屋外タンク貯蔵所基礎の規制基準等に表示されている地盤反力係数の値を表 4.9 に示す。屋外タンク貯蔵所基礎の規制基準砂マウンドの K_{30} と比較し、4～5 倍であった。

表 4.9 新法タンクにおける鉛直地盤反力係数の基準値及び JIS における設定値

		地盤反力係数 K_{30}
屋外タンク貯蔵所基礎の 規制基準	砕石リング	$1.96 \times 10^5 \text{kN/m}^3$ 以上
	砂マウンド	$0.98 \times 10^5 \text{kN/m}^3$ 以上
JIS B 8501 (鋼製石油貯槽の構造) 設定値		$1.47 \times 10^5 \text{kN/m}^3$ 以上

(4) 測定方法による差

今回基準標高からタンクの内壁に仮 B.M を設置し、以下の 3 種類の計測法を実施した。

- ① レベル測量による沈下量計測
- ② レーザーレベル計による沈下量計測
- ③ タンクスケールによる沈下量計測

水位とこれらの計測方法による底板の沈下量の平均値の関係を図 4.56 に示す。タンクスケールによる沈下量計測でも結果に大きな差はないことが分かる。

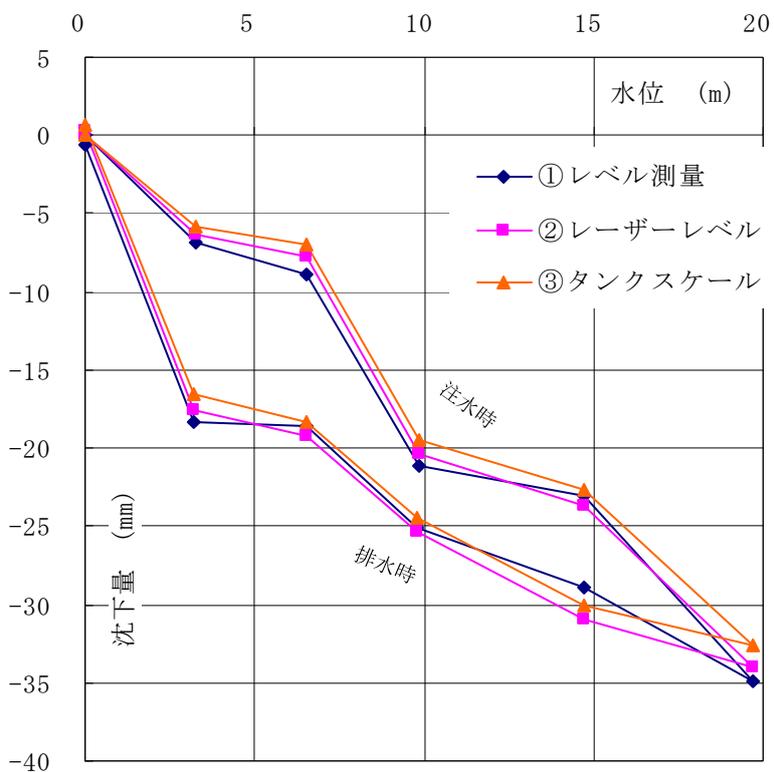


図 4.56 水位と底板の沈下量の平均値の関係

第5章 有限要素法を用いた沈下シミュレーション

5.1 屋外貯蔵タンクの基礎地盤沈下に係る FEM 解析の方法

(1) 使用する解析コード

使用する解析コードは、弾塑性が表現でき、さらに離間が表現できるプログラムが望ましい。解析 STEP を細かく刻み、前 STEP の結果により地盤剛性等を変化させその STEP の解析を実施する。

今回の検討では、汎用プログラム ABAQUS を利用し、解析 STEP を細かく刻み、前 STEP の結果により地盤剛性の変化をサブルーチン化した。

(2) 構造モデル

構造モデルのイメージを図 5.1 に示す。解析範囲は屋外貯蔵タンクの径を d とすると、平面方向には $6d$ 、深さ方向には $3d$ をとる。地盤の境界条件は、底面および外周面はピンローラーとし、底板と地盤の境界は接触要素で表現する。

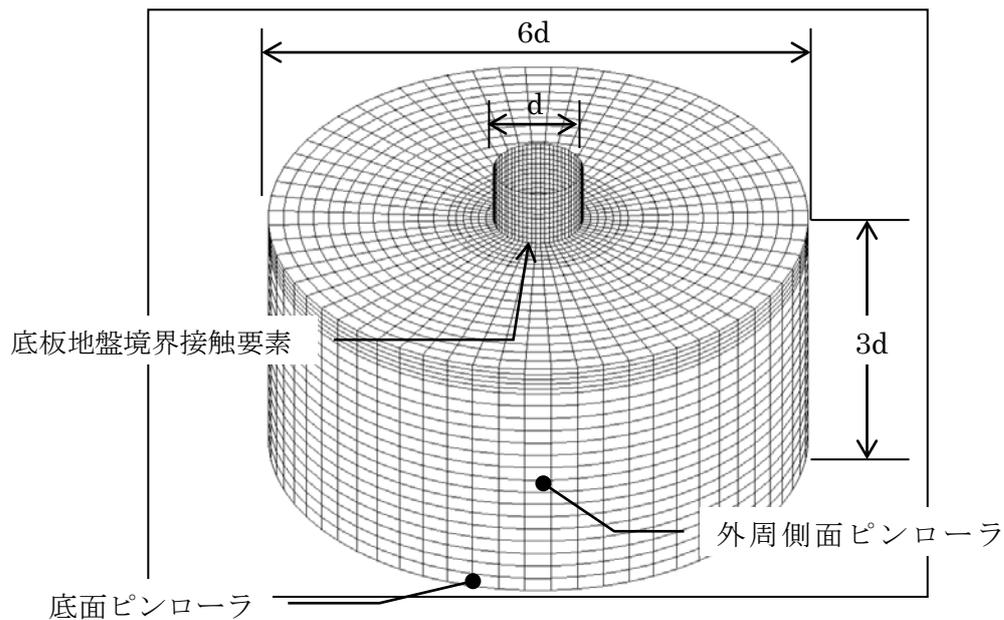


図 5.1 構造モデルのイメージ

(3) FEM 解析の PHASE と地盤剛性変化の設定

FEM 解析は図 5.2 に示す 3 つの PHASE で実施する。PHASE1 では地盤剛性の初期状態を求め、PHASE2 では地盤応力の初期状態を求める。PHASE1 および PHASE2 で求めた初期状態の元、PHASE3 の水張試験のシミュレートを行う。

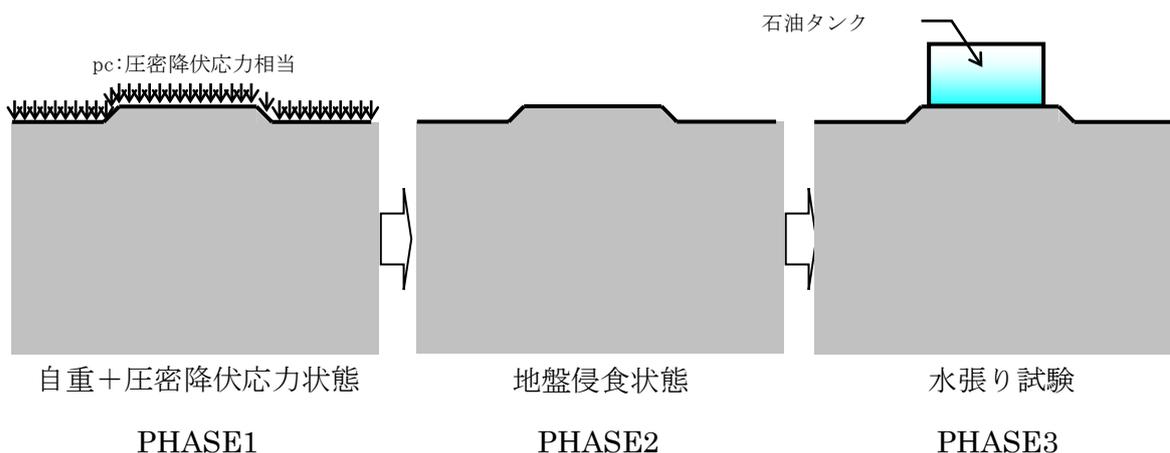


図 5.2 FEM 解析の 3 つの PHASE

いずれの PHASE でも、地盤の破壊曲面は Mohr-Coulomb で規定する。Mohr-Coulomb のパラメータである土の粘着力 c 、土の内部摩擦角 ϕ は、当該地盤からサンプルされた試料に対する三軸試験から得られるものを用いるのが望ましい。当該地盤の三軸試験結果がない場合には、 N 値等から推定する。また地盤のポアソン比 ν は ϕ から求めるものとし、 $\phi = 0$ の場合もしくは破壊規準に達した時は $\nu = 0.495$ とする。

- ・ 破壊規準：Mohr-Coulomb c ：土の粘着力 ϕ ：土の内部摩擦角
 破壊規準に載った場合は一次剛性の α_{py} 倍に剛性低下
 c 、 ϕ は三軸試験結果より
 三軸試験結果がない場合、 $\phi = \sqrt{15N} + 15$ とした。
- ・ ポアソン比 ν $\nu = \frac{1 - \sin\phi}{2 - \sin\phi}$ ϕ ：土の内部摩擦角
 ただし $\phi = 0$ の場合、破壊規準に達した時 $\nu = 0.495$

PHASE1、2 では図 5.3 のフローで地盤剛性の初期状態を設定する。PHASE1、2 での剛性変化は、地盤要素の塑性ひずみ成分の変化によるものと考えた。

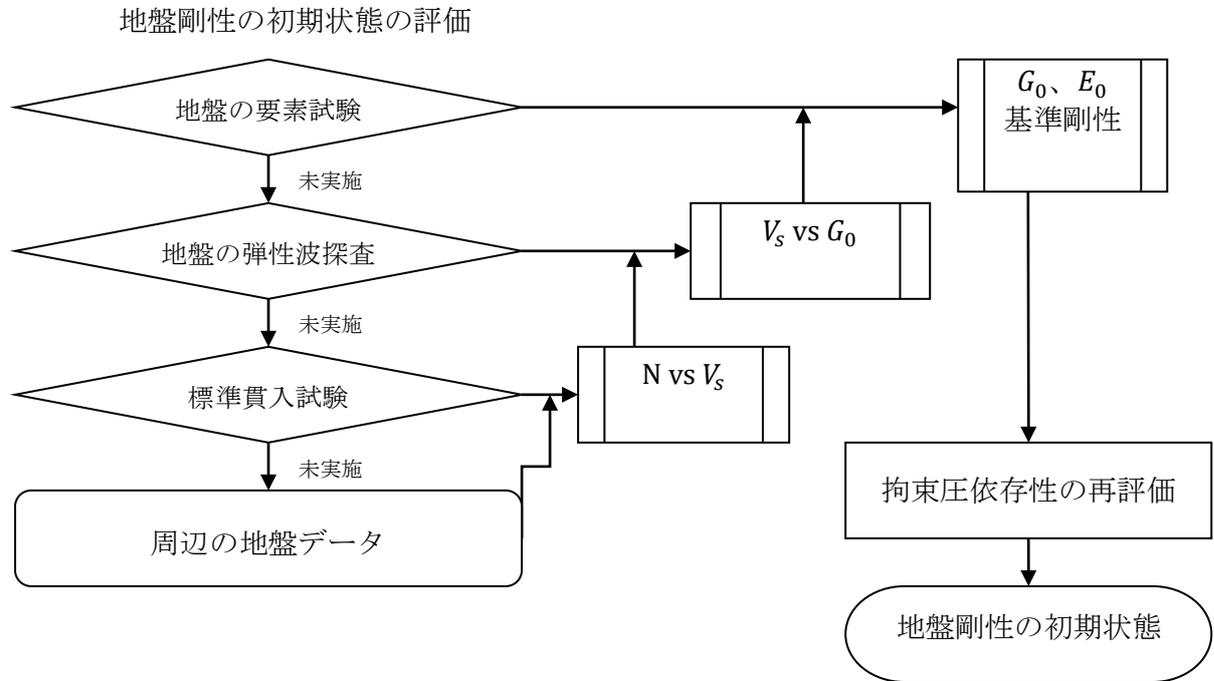


図 5.3 地盤剛性の初期状態の評価フロー

地盤の剛性はそれまで受けてきた荷重履歴を反映している。このため、基準剛性とそれに対応する拘束圧を元に、荷重履歴による拘束圧の変化に起因する剛性変化を評価して地盤剛性の初期状態を設定する。剛性変化の程度は、(履歴最大最小主応力/基準拘束圧)の0.5乗に比例するとした。またせん断応力により剛性も変化するが、処女せん断応力状態時の塑性ひずみ成分変化による剛性変化は DUNCAN-CHANG 式で評価することとした。PHASE1、2 の除荷時には剛性変化はしないものとした。

・地盤の一次剛性 E_{i+1} 基準剛性 E_0

($i+1$)step 時の剛性 E_{i+1} を、(i)step までの最小主応力 $\sigma_{3,1 \sim i}$ より下式で修正する。

$$E_{i+1} = E_0 \times (\sigma_{3,L}/p_e)^{0.5} \quad \text{ここで、} p_e : \text{基準拘束圧}$$

$$\sigma_{3,L} = \max(\sigma_{3,1 \sim i-1})$$

・降伏規準内剛性

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_j \geq \max[(\sigma_1 - \sigma_3)_{0 \sim j-1}]$$

$$\text{接線剛性} \quad E_t = \left(1 - \frac{R_f(1 - \sin\phi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2 \cdot c \cdot \cos\phi + 2 \cdot \sigma_3 \cdot \sin\phi}\right)^2 E_j$$

R_f : 破壊比

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_j \leq \max [(\sigma_1 - \sigma_3)_{0 \sim j-1}] \quad \text{地盤一次剛性 } E_{i+1}$$

基準剛性とそれに対応する拘束圧は、当該地盤のサンプル試料に対する三軸試験から得られるものを使用するのが望ましい。当該地盤の三軸試験結果がない場合には、弾性波探査あるいは N 値と V_s の関係より推定した剛性 E_0 を基準剛性とし、N 値と V_s の関係より推定した基準剛性に対応する拘束圧 $p_e = 180 \text{ kN/m}^2$ とすることとした。基準剛性に対応する拘束圧は設定根拠はないので、今後の検討により適切な拘束圧を定めることが必要と思われる。弾性波探査から地盤の基準剛性は下式で求める。

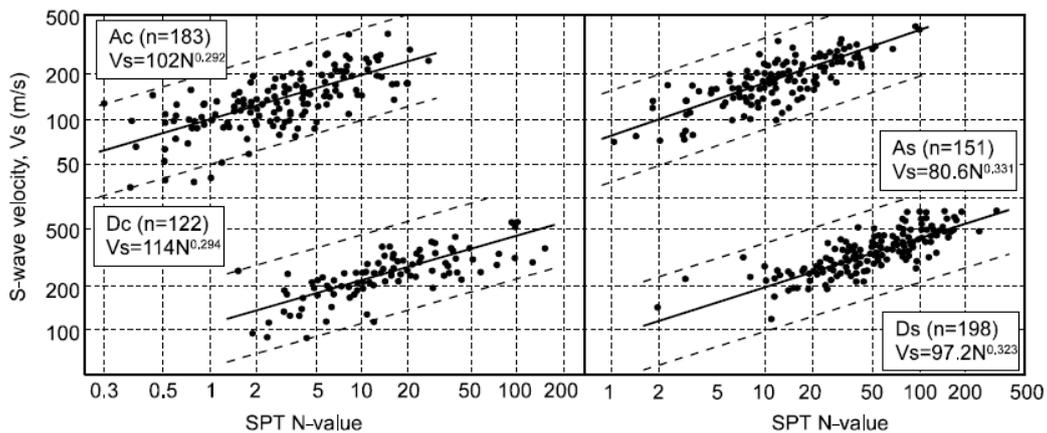
$$\text{せん断弾性係数 } G_0 = \rho V_s^2$$

ρ : 質量密度

V_s : 地盤のせん断弾性波速度

基準拘束圧は求めた深度相当とする

標準貫入試験の N 値より地盤の基準剛性推定する場合は図 5.4 で求める。



沖積砂質土 (As)	$V_s = 80.6N^{0.311}$	沖積粘性土 (Ac)	$V_s = 102N^{0.292}$
洪積砂質土 (Ds)	$V_s = 97.2N^{0.323}$	洪積粘性土 (Dc)	$V_s = 114N^{0.292}$

$$\text{基準拘束圧 } p_e = 180 \text{ kN/m}^2$$

図 5.4 標準貫入試験の N 値と V_s

PHASE1 では、圧密降伏応力相当の荷重履歴を反映させ、自重+圧密降伏応力まで地表面に自重方向へ多 STEP で載荷することとした。地盤が受けてきた荷重履歴は、圧密降伏応力で代表されることが多い。圧密降伏応力もサンプル採取した地盤の深度に対応した自重の影響も受けているが、簡単のため、自重に加え圧密降伏応力相当の荷重を地表面に載荷することにより、それまで受けてきた荷重履歴を評価することとした。自重+圧密降伏応力まで地表面に自重方向へ多 STEP で載荷することにより、STEP 毎の剛性変化が評価できる。FEM 解析では、小さな剛性に大きな荷重を加えた際うまく計算できない場合があるため、剛性の最低値を設定するか、荷重 STEP 数を多くして荷重増分を小さくすると

いった配慮が必要である。

PHASE2 では、水張り試験実施前の状態を設定する。圧密降伏応力を取り除き、自重のみの水張り試験実施前の地盤の応力状態を求める。

PHASE3 では、水張り水位を増減し、水張り試験をシミュレートする。この際には弾性成分の剛性の拘束圧依存性およびひずみ依存性を考慮することとした。PHASE1、2 で得られた剛性を初期剛性とし、 $(i + 1)$ STEP の剛性変化の拘束圧依存性は、 $((i)$ STEP の最小主応力/自重時の最小主応力) の 0.5 乗に比例することとした。剛性変化のひずみ依存性は、除荷、再載荷の開始時からの最大主ひずみの増分に依存することとした。剛性変化のひずみ依存性の程度は、当該地盤のサンプル試料に対する三軸試験から得られるものを使用するのが望ましい。当該地盤の三軸試験結果がない場合には、既往の研究資料(木幡行宏、村田修 せん断剛性比のひずみレベル依存性に関する定式化 土木学会第 55 回年次学術講演会)を参考に定めることとした。

- ・ 地盤の一次剛性 E_{i+1} 初期地盤剛性 E_0 PHASE2 終了時(水張り試験直前)の剛性 $(i + 1)$ step 時の各要素の剛性 E_{i+1} を (i) step の最小主応力 $\sigma_{3,i}$ より下式で修正する。

$$E_{i+1} = E_0 \times (\sigma_{3,i} / \sigma_{3,0})^{0.5} \quad \text{ただし } E_{i+1} \geq E_0$$

ここで $\sigma_{3,0}$ は PHASE2 終了時(水張り試験直前)の最小主応力

- ・ 降伏規準内剛性 $(j + 1)$ step

$$\text{接線剛性 } E_{t,j+1} : E_{t,j+1} = E_j \times K$$

ここで $K = \exp(-\Delta\varepsilon \times \alpha_K)$ ただし $K \geq K_{\min}$

$\Delta\varepsilon$: 除荷時 除荷開始点の ε_{1U} と (j) step の ε_1 との差の絶対値

再載荷時 再載荷開始点の ε_{1R} と (j) step の ε_1 との差の絶対値

ここで ε_1 は最大主ひずみ

α_K 、 K_{\min} : 剛性のひずみ依存性の程度を評価するパラメータ

土要素のひずみ依存性は、割線せん断剛性 G とせん断ひずみ γ の関係として下式にまとめられている。

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \alpha \cdot \gamma^\beta}$$

ここで、 α 、 β は表 5.1 に示す。

表 5.1 ひずみ依存性の α 、 β

地盤材料	α	β
沖積粘性土	135.997	0.804
洪積粘性土	270.033	0.824
沖積砂質土	603.053	0.854
洪積砂質土	603.902	0.942

木幡行宏, 村田修 せん断剛性比のひずみレベル依存性に関する定式化 土木学会第 55 回年次学術講演会

これを割線剛性 E と軸ひずみ ε_a の関係に直すと

$$\frac{E}{E_0} = \frac{1}{1 + \alpha \cdot [(1 + \nu)\varepsilon_a]^\beta}$$

ν : ポアソン比

これより応力ひずみ関係は

$$\begin{aligned} \sigma &= E \cdot \varepsilon_a \\ &= \frac{\varepsilon_a}{1 + \alpha \cdot [(1 + \nu)\varepsilon_a]^\beta} E_0 \end{aligned}$$

接線剛性は $\frac{d\sigma}{d\varepsilon_a}$ なので、ひずみ依存性の影響度を K であらわすと

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon_a} = KE_0$$

$$K = d\left(\frac{\varepsilon_a}{1 + \alpha \cdot [(1 + \nu)\varepsilon_a]^\beta}\right) / d\varepsilon_a$$

となる。ここでは簡単のため

$$K = \exp(-\Delta\varepsilon \times \alpha_K)$$

とし、ひずみ適用範囲により α_K を定めることとした。

5.2 平板載荷試験の FEM 解析

(1) FEM 解析の対象とした平板載荷試験

FEM 解析の対象とした平板載荷試験は、千葉県印西市草深字原 2027 で実施されたものであり、地表面から 1.6m 掘削しその底面で実施した。その地盤条件をまとめて図 5.5 に示す。

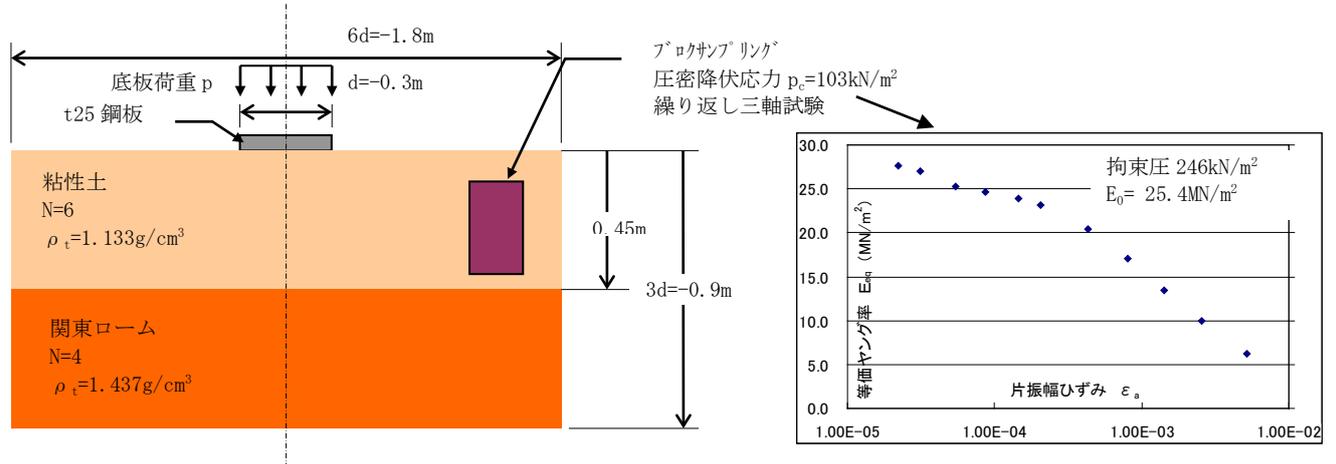


図 5.5 平板載荷試験の地盤条件

地盤工学会基準に準拠した方法による平板載荷試験結果を図 5.6 に示す。

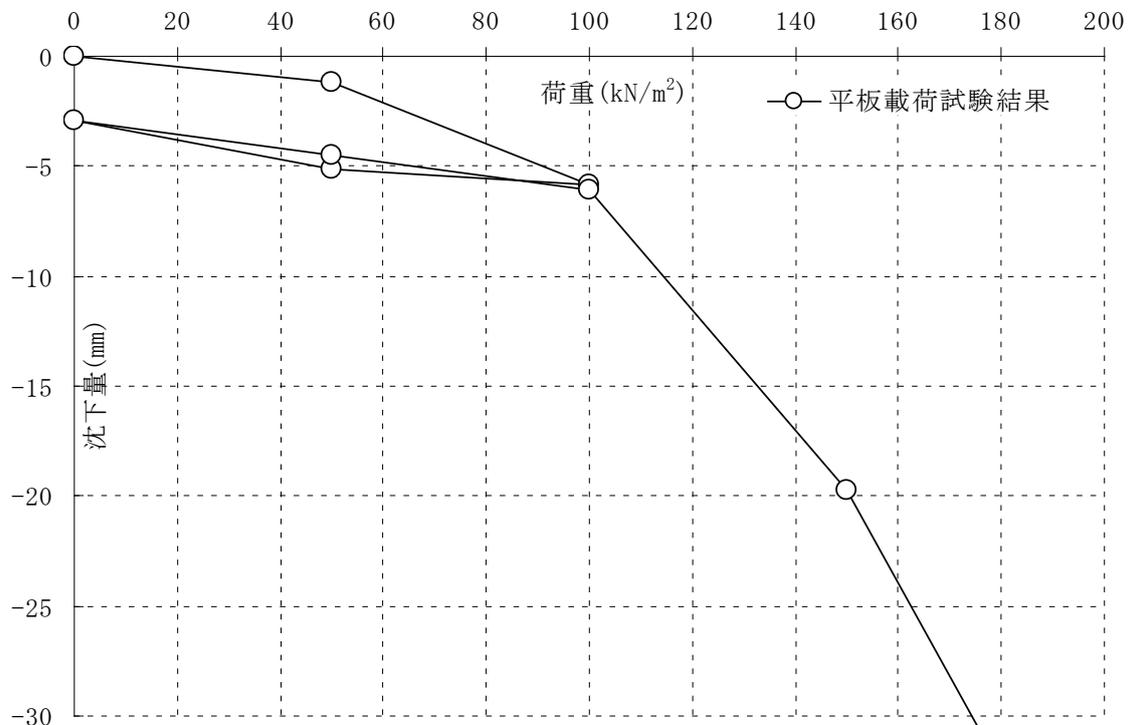


図 5.6 地盤工学会基準に準拠した方法による平板載荷試験結果

(2) 構造モデル

構造モデルのイメージを図 5.7 に示す。解析範囲は円板の径 $d = 0.3m$ であり、平面方向には $6d (= 1.8m)$ 、深さ方向には $3d (= 0.9m)$ とした。地盤の境界条件は、底面および外周面はピンローラーとし、円板と地盤の境界は接触要素で表現した。地盤は $\rho_t = 1.133 g/cm^3$ の一様地盤とした。

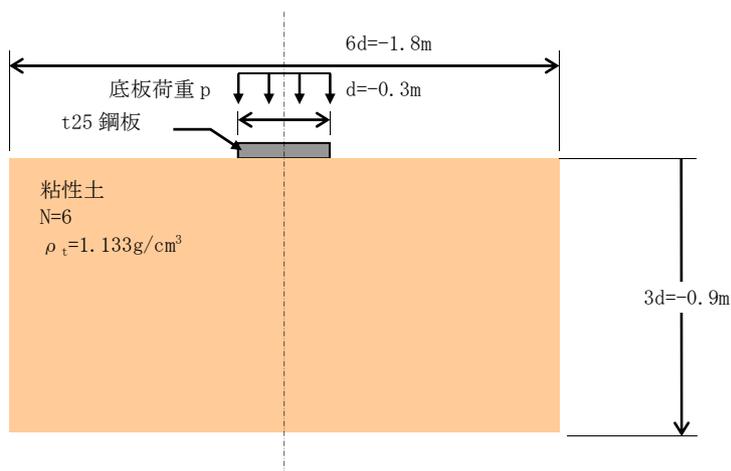


図 5.7 構造モデルのイメージ

(3) FEM 解析の PHASE

FEM 解析は 3つの PHASE で実施する。

PHASE1：初期剛性設定解析 地盤剛性の初期状態を設定する

図 5.8 の自重+圧密降伏応力 ($p_c = 103kN/m^2$)状態まで多段階で載荷する。拘束圧 $p_e = 246kN/m^2$ で実施したブロックサンプリング試料による繰り返し三軸試験で得られた剛性 $E_0 = 25.3 MN/m^2$ を基準剛性とした。

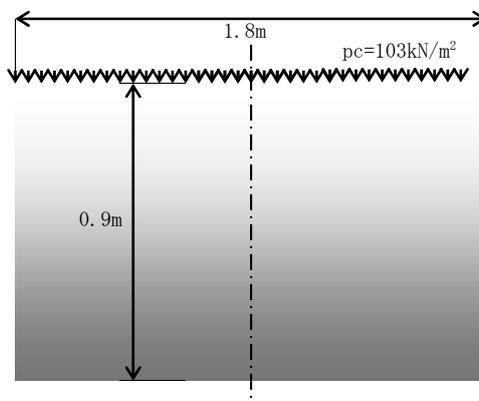


図 5.8 自重+圧密降伏応力状態

PHASE2 : 地盤侵食状態 平板载荷試験前の地盤応力の初期状態を設定する

圧密降伏応力を取り除き、図 5.9 の平板载荷実施前の状態を設定する。

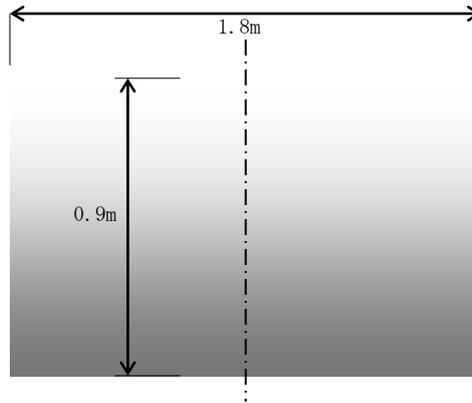


図 5.9 平板载荷実施前の状態

PHASE3 : 平板载荷試験

図 5.10 の p を増減し、平板载荷試験をシミュレートする。

【荷重条件】

$p = 0\text{kN/m}^2 \rightarrow 50\text{kN/m}^2 \rightarrow 100\text{kN/m}^2 \rightarrow 50\text{kN/m}^2 \rightarrow 0\text{kN/m}^2$
 $\rightarrow 50\text{kN/m}^2 \rightarrow 100\text{kN/m}^2 \rightarrow 150\text{kN/m}^2 \rightarrow 200\text{kN/m}^2$

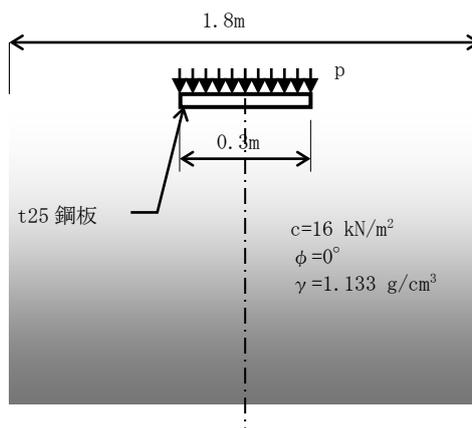


図 5.10 平板载荷試験

(4) 各 PHASE における地盤剛性変化に関するパラメータ

a) PHASE1~3 での地盤剛性変化に関するパラメータ

地盤の破壊規準等はブロックサンプリング試料の特性を元に以下のように設定した。

・地盤の密度 $\rho_t = 1.133 \text{ g/cm}^3$

・破壊規準 : Mohr-Coulomb

c : 土の粘着力 (= 0.013 N/mm^2) ϕ : 土の内部摩擦角 (= 0°)

降伏規準に載った場合、一次剛性の 1/50 に剛性低下

・ポアソン比 ν : $\phi = 0$ なので $\nu = 0.495$

b) PHASE1、2 での地盤剛性変化に関するパラメータ

PHASE1、2 でのパラメータは三軸試験結果を元に以下のように設定した。

・地盤の一次剛性 E_{i+1} 基準剛性 E_0 $E_0 = 25.3 \text{ MN/m}^2$

($i + 1$)step 時の剛性 E_{i+1} を、(i)step までの最小主応力 $\sigma_{3,1 \sim i}$ より下式で修正する。

$E_{i+1} = E_0 \times (\sigma_{3,L}/p_e)^{0.5}$ ここで、 p_e : 基準拘束圧 (= 246 kN/m^2)

$$\sigma_{3,L} = \max(\sigma_{3,1 \sim i-1})$$

・降伏規準内剛性

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_j \geq \max[(\sigma_1 - \sigma_3)_{0 \sim j-1}]$$

$$\text{接線剛性} \quad E_t = \left(1 - \frac{R_f(1 - \sin\phi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2 \cdot c \cdot \cos\phi + 2 \cdot \sigma_3 \cdot \sin\phi}\right)^2 E_j$$

R_f : 破壊比 (ここでは $R_f = 0.859$ とする)

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_j \leq \max[(\sigma_1 - \sigma_3)_{0 \sim j-1}] \quad \text{地盤一次剛性} \quad E_{i+1}$$

ブロックサンプリング試料による繰返し三軸試験結果に片振幅軸ひずみ ε_a と等価ヤング率 E_{eq} が示されているが、この結果は弾性成分のみの結果なので、塑性ひずみ成分を仮定して、三軸圧縮試験結果を推定した。応力 σ_{i+1} と応力 σ_i の間の塑性ひずみ成分の増分量 $\Delta\varepsilon_{yi}$ は、 $\Delta\varepsilon_{yi} = \frac{\sigma_i}{E_{i+1}} - 1$ 、 $\sigma = 32.3 \text{ kN/m}^2$ (= $E_{eq} \times$ 片振幅軸ひずみの最大値) 以降は初期剛性の 1/50 とした。この $\sigma - \varepsilon$ 関係と上記地盤要素特性の設定で求めた $\sigma - \varepsilon$ 関係を比較し、図 5.11 に示す。

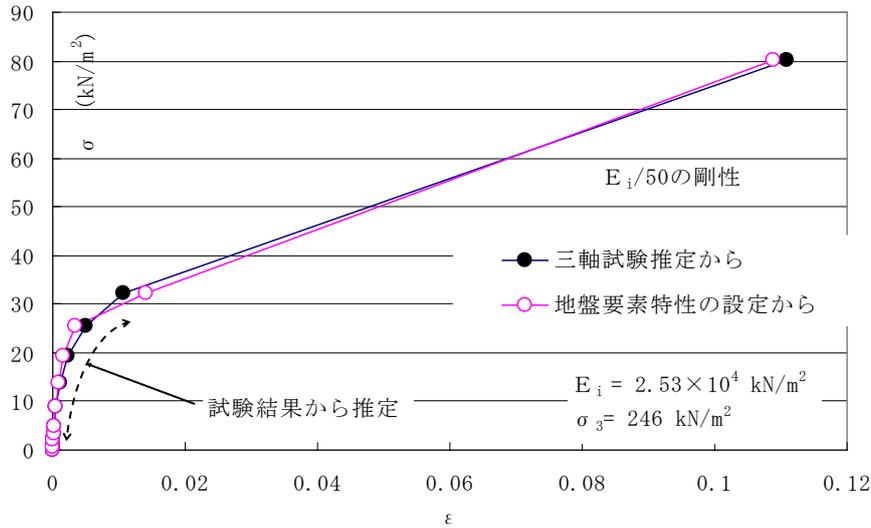


図 5.11 応力ひずみ関係の比較

c) PHASE3 での地盤剛性変化に関するパラメータ

PHASE3 でのパラメータは三軸試験結果を元に以下のように設定した。

$$E_{i+1} = E_0 \times (\sigma_{3,i}/\sigma_{3,0})^{0.5} \quad \text{ただし } E_{i+1} \geq E_0$$

ここで $\sigma_{3,0}$ は平板載荷試験実施直前の最小主応力

・降伏規準内剛性 (j + 1)step

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_j \geq \max [(\sigma_1 - \sigma_3)_{0 \sim j-1}]$$

$$\text{接線剛性} \quad E_{t,j+1} = \left(1 - \frac{R_f(1 - \sin\phi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2 \cdot c \cdot \cos\phi + 2 \cdot \sigma_3 \cdot \sin\phi} \right)^2 E_j$$

R_f : 破壊比 (ここでは $R_f = 0.859$ とする)

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_j \leq \max [(\sigma_1 - \sigma_3)_{0 \sim j-1}] \quad \text{地盤一次剛性 } E_{i+1}$$

$$\text{接線剛性} \quad E_{t,j+1} : E_{t,j+1} = E_j \times K$$

ここで $K = \exp(-\Delta\varepsilon \times 700)$ 　ただし $K \geq 0.1$

$\Delta\varepsilon$: 除荷時　除荷開始点の ε_{1U} と (j)step の ε_1 との差の絶対値

再載荷時　再載荷開始点の ε_{1R} と (j)step の ε_1 との差の絶対値

ここで ε_1 は最大主ひずみ

ブロックサンプリング試料による繰返し三軸試験結果に片振幅軸ひずみ ε と等価ヤング率 E_{eq} が示されており、 $\sigma = E_{eq} \cdot \varepsilon$ で σ を算定し $\sigma - \varepsilon$ の関係を求めた。これが弾性成分のひずみ

依存性を表していると考え、その接線成分 E_t と初期剛性 E_0 の比のひずみ依存性と上記 K を比較し図 5.12 に示す。

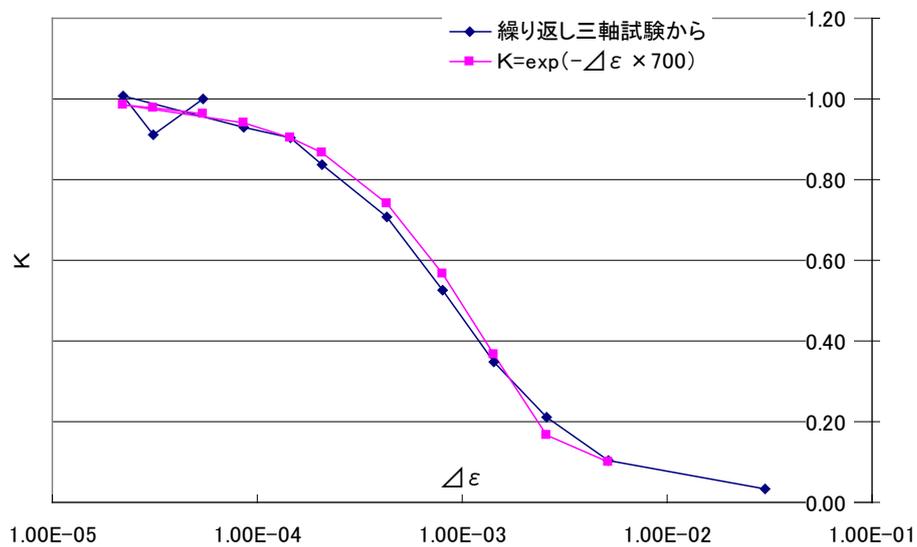


図 5.12 ひずみ依存性の評価

(5) 解析結果

a) 底板荷重 p と沈下量の関係

解析メッシュと沈下量を注目した節点を図 5.13 に示す。

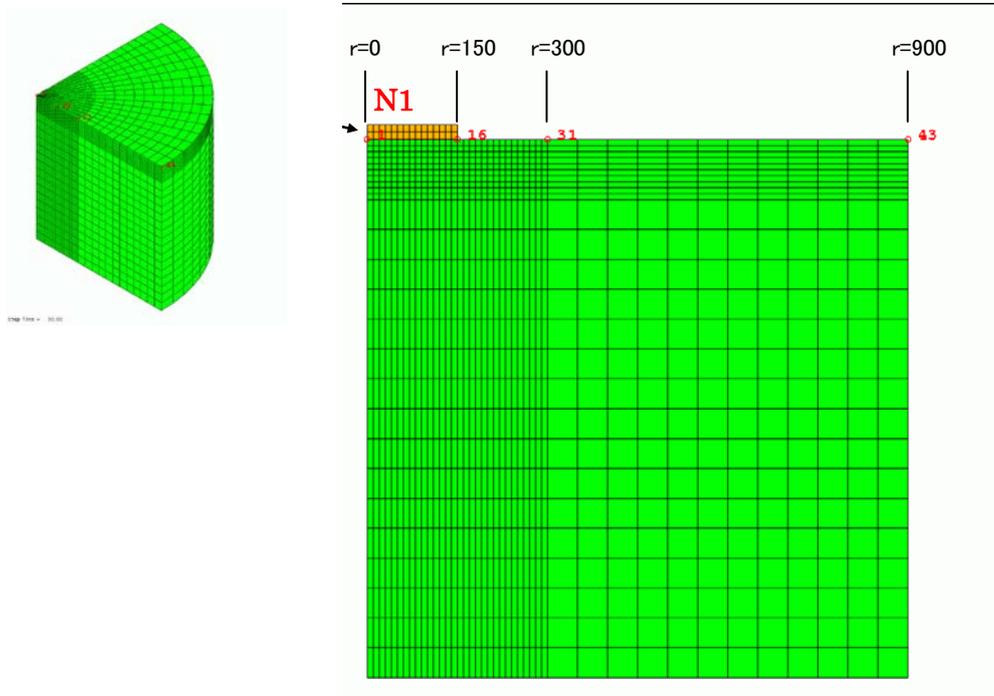


図 5.13 解析メッシュと沈下量を注目した節点

底板荷重 p と N1 の沈下量関係を平板荷重試験結果とともに図 5.14 に示す。

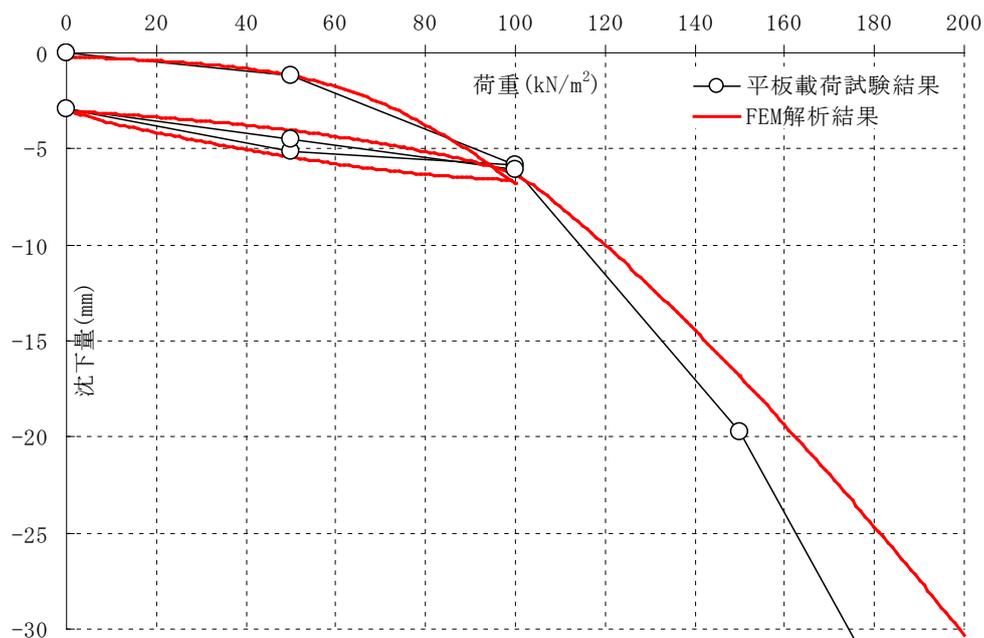


図 5.14 底板荷重 p と沈下量の関係

b) 設計で用いられる剛性での荷重沈下評価との比較

地盤剛性を $E = 2,800N (kN/m^2)$ (ここで $N = 6$ とする) として評価した荷重沈下関係、三軸試験より得られた剛性 ($E = 25.3 MN/m^2$) として評価した荷重沈下関係、 K_{30} の荷重沈下関係を平板載荷試験結果および FEM 解析結果と比較し図 5.15 に示す。

なお、荷重沈下関係は下式で評価した。

$$S_e = \frac{I_s(1 - \nu^2)Bq}{1000E}$$

S_e : 沈下量 (mm)

I_s : 形状係数 (= 0.785)

ν : ポアソン比 (= 0.5)

B : 円板径 (= 0.3 m)

q : 荷重 (kN/m^2)

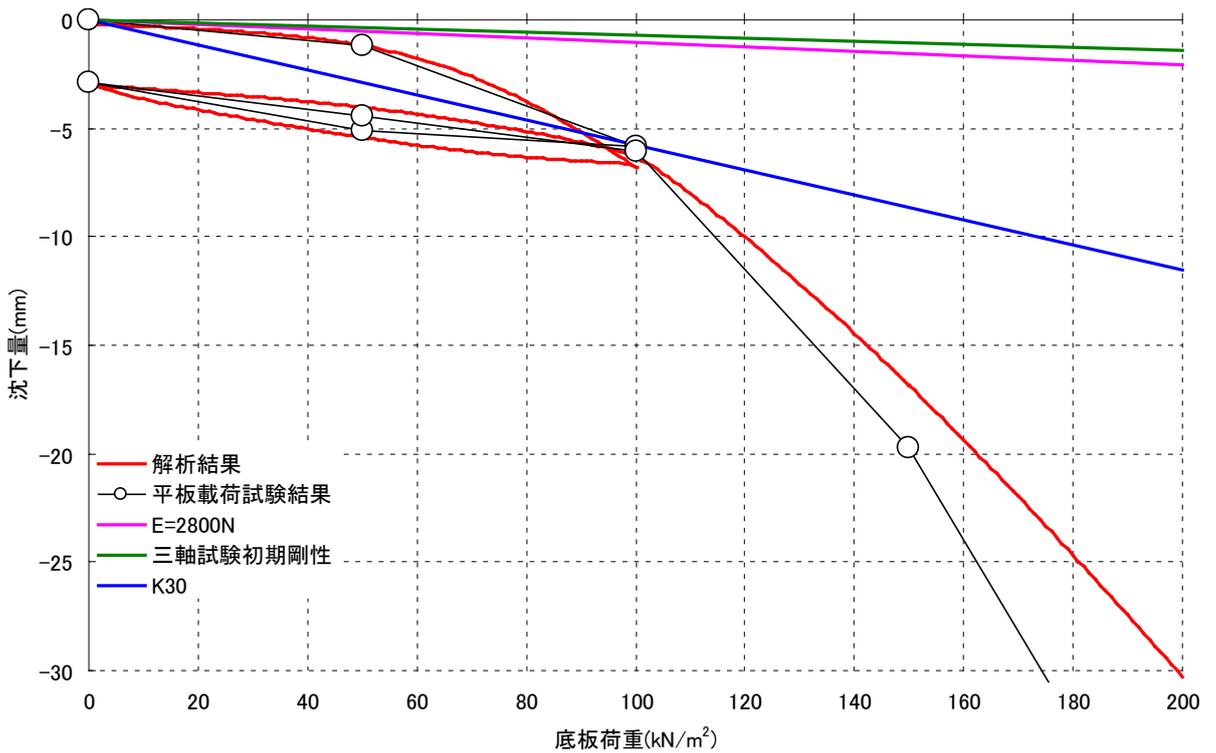


図 5.15 荷重沈下関係の比較

5.3 水張試験の FEM 解析（地盤の沈下シミュレーション）

（1）FEM 解析モデル

FEM 解析の構造モデルのイメージを図 5.16 に示す。FEM 解析の構造モデルは、軸対称で、外周側面および底面の境界条件はピンローラーとし、底板と地盤の境界は接触条件とする。

地盤強度特性 c 、 ϕ は、砂質土層、粘性土層は三軸試験結果より、砂質泥岩は既往資料より設定した。水張試験直前の地盤の初期剛性は、N 値よりの推定式で初期剛性の基準値 E_0 を設定し、その基準値は拘束圧 180kN/m^2 に対応していると考え、当該位置の拘束圧の履歴を加味し算定した。砂質土は N 値が示されていないため、内部摩擦角 ϕ より、 $\phi = \sqrt{15N} + 15$ より逆算して求めた。水張試験時には、地盤剛性の拘束圧依存性およびひずみ増分依存性を考慮し、挙動を算定した。

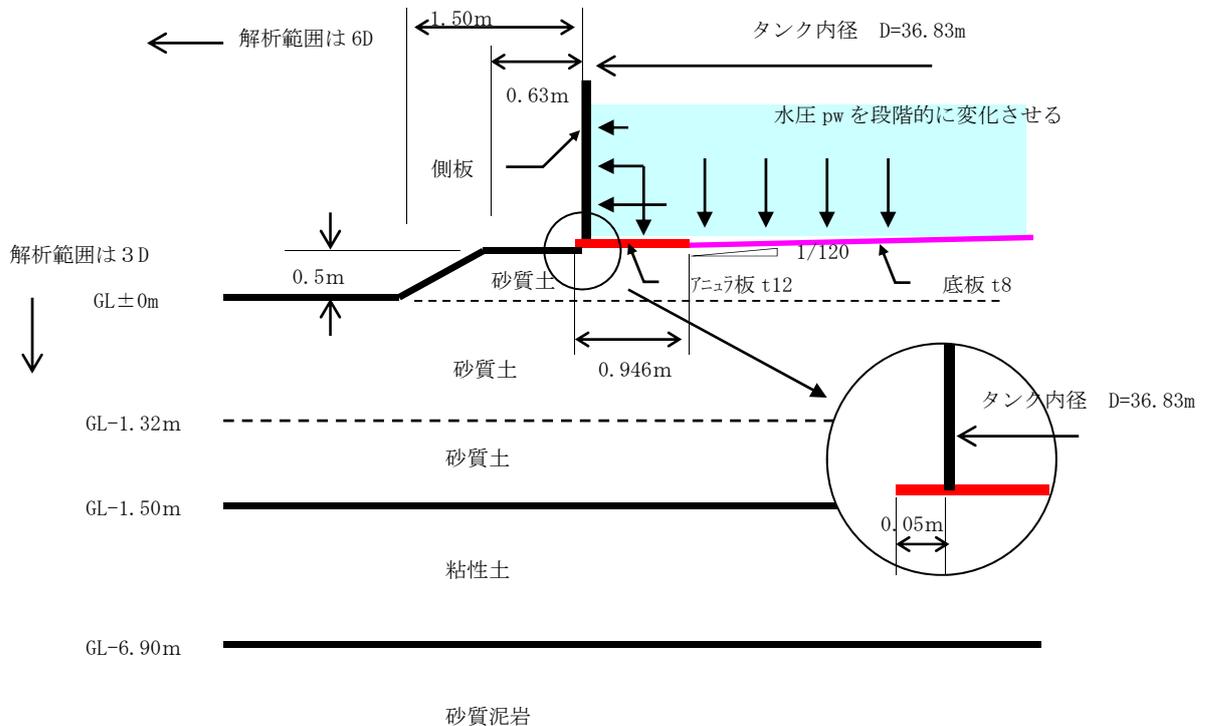


図 5.16 FEM 解析構造モデルのイメージ

初期剛性の基準値 $E_0 = 2(1 + \nu)G_0$ (ν : ポアソン比)

せん断弾性係数 $G_0 = \rho V_s^2$ (ρ : 質量密度 V_s : 地盤のせん断弾性波速度)

沖積砂質土 (As)	$V_s = 80.6N^{0.311}$	沖積粘性土 (Ac)	$V_s = 102N^{0.292}$
洪積砂質土 (Ds)	$V_s = 97.2N^{0.323}$	洪積粘性土 (Dc)	$V_s = 114N^{0.292}$

(2) FEM 解析の PHASE

FEM 解析は図 5.17 に示す 3 つの PHASE で実施する。

PHASE1 : 初期剛性設定解析 <地盤剛性の初期状態を設定する>

自重+圧密降伏応力 $p_c(105 \text{ kN/m}^2)$ 状態まで多段階で載荷する。N 値と地盤特性より推定した剛性 E_0 を基準剛性とする。基準剛性に対応する拘束圧 $p_e = 180 \text{ kN/m}^2$ とする。圧密降伏応力 $p_c = 105 \text{ kN/m}^2$ は地表面全面に自重方向へ載荷する。

PHASE2 : 地盤侵食状態 <水張り試験前の地盤応力の初期状態を設定する>

圧密降伏応力を取り除き、水張り試験実施前の地盤応力状態を設定する。

PHASE3 : 水張り試験

水張り水位を増減し、水張り試験をシミュレートする。

【水張り水位】

0m → 3.3m → 6.5m → 9.8m → 14.7m → 19.7m → 14.7m
→ 9.8m → 6.5m → 3.2m → 0m

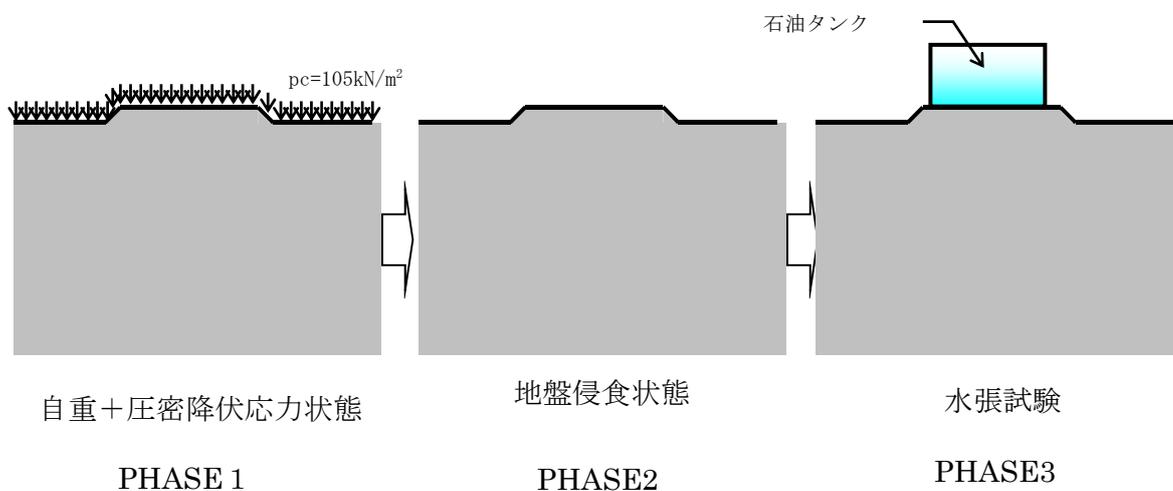


図 5.17 FEM 解析の PHASE

(3) 地盤剛性変化に関するパラメータ

地盤剛性変化に関するパラメータを表 5.2 に示す。

表 5.2 地盤特性評価のパラメータ

	砂質土	砂質土	砂質土	粘性土	砂質泥岩
土質種類	沖積砂質土	沖積砂質土	沖積砂質土	沖積粘性土	洪積粘性土
位置(m)	0.55~0	0~-1.32	-1.32~-1.50	-1.50~-6.90	-6.90~
$\gamma_t(kN/m^3)$	14.0	14.0	16.9	17.4	15.5
$\rho_t(kg/m^3)$	1,429	1,429	1,724	1,776	1,582
N 値	28.8	28.8	28.8	0.9	50
$V_s(m/s)$	229	229	229	99	357
$G_0(kN/m^2)$	75,153	75,153	90,672	17,370	201,890
$c(kN/m^2)$	16.0	16.0	16.0	25.48	1146.6
$\phi(^{\circ})$	35.8	35.8	35.8	17.33	43.5
ν	0.29	0.29	0.29	0.41	0.24
$E_0(kN/m^2)$	194,288	194,288	234,533	49,070	499,717
α_{py}	1/30	1/30	1/30	1/100	1/100
R_t	0.817	0.817	0.817	0.9	0.9
$p_e(kN/m^2)$	180	180	180	180	180
α_K	800	800	800	400	1,200
K_{min}	0.05	0.05	0.05	0.15	0.2

地盤の諸特性は、ボーリング調査、標準貫入試験、ブロックサンプリング試料に対する三軸試験、シンウォールサンプリング試料に対する圧密試験および三軸試験の結果を元に設定した。

砂質泥岩は既往の資料を参考にした。

砂質土の N 値は、内部摩擦角 ϕ より、 $\phi = \sqrt{15N} + 15$ を逆算して求めた。

V_s は N 値より下式で求めた。

$$\text{沖積砂質土 (As)} \quad V_s = 80.6N^{0.311} \quad \text{沖積粘性土 (Ac)} \quad V_s = 102N^{0.292}$$

$$\text{洪積粘性土 (Dc)} \quad V_s = 114N^{0.292}$$

せん断弾性係数 G_0 は下式で求めた。

$$G_0 = \rho V_s^2 \quad (\rho : \text{質量密度} \quad V_s : \text{地盤のせん断弾性波速度})$$

基準剛性 E_0 は下式で求めた。

$$E_0 = 2(1 + \nu)G_0$$

基準拘束圧は $p_e = 180 \text{ kN/m}^2$ とした。

図 5.18～図 5.20 に示すように、 α_K 、 K_{\min} は、沖積砂質土では 0.003 以上のひずみレベルで、沖積粘性土では 0.001 から 0.003 のひずみレベルで、洪積粘性土では 0.001 までのひずみレベルで、既往研究資料より算定される K とマッチするように設定した。

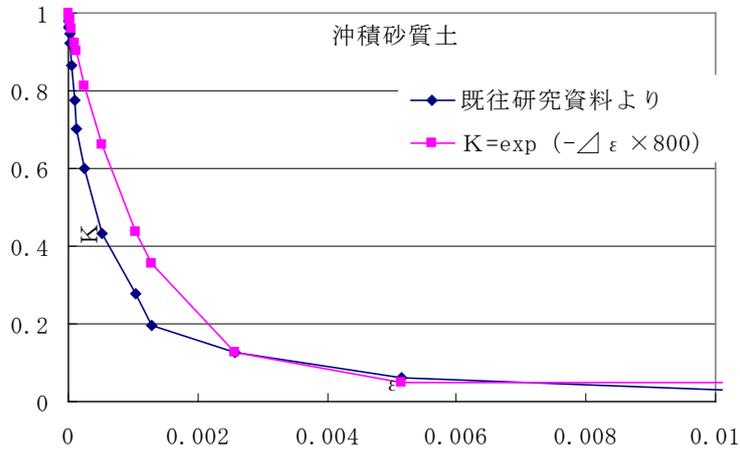


図 5.18 α_K 、 K_{\min} の設定 (沖積砂質土)

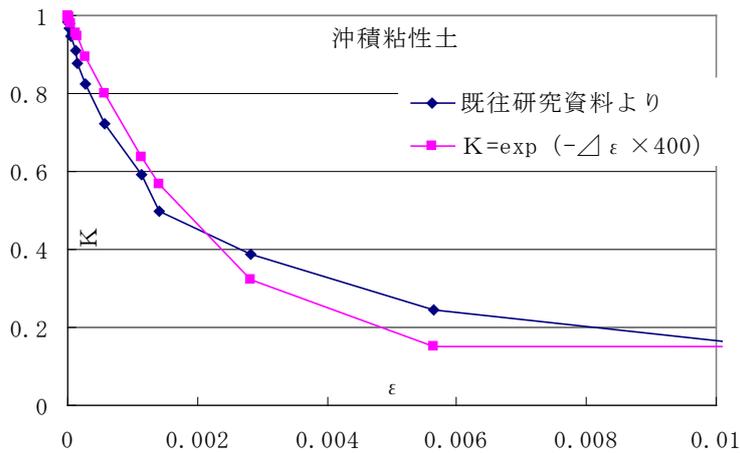


図 5.19 α_K 、 K_{\min} の設定 (沖積粘性土)

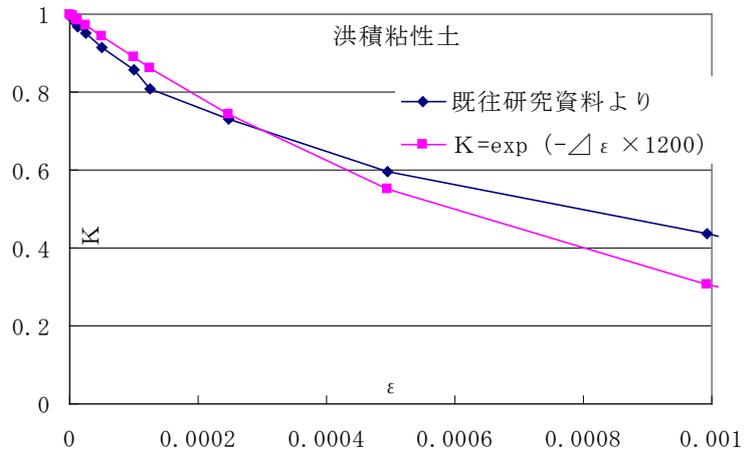


図 5.20 α_K 、 K_{\min} の設定 (洪積粘性土)

(4) 解析結果

a) 底板荷重 p と沈下量の関係

解析メッシュの拡大図と沈下量を注目した節点位置を図 5.21 に示す。

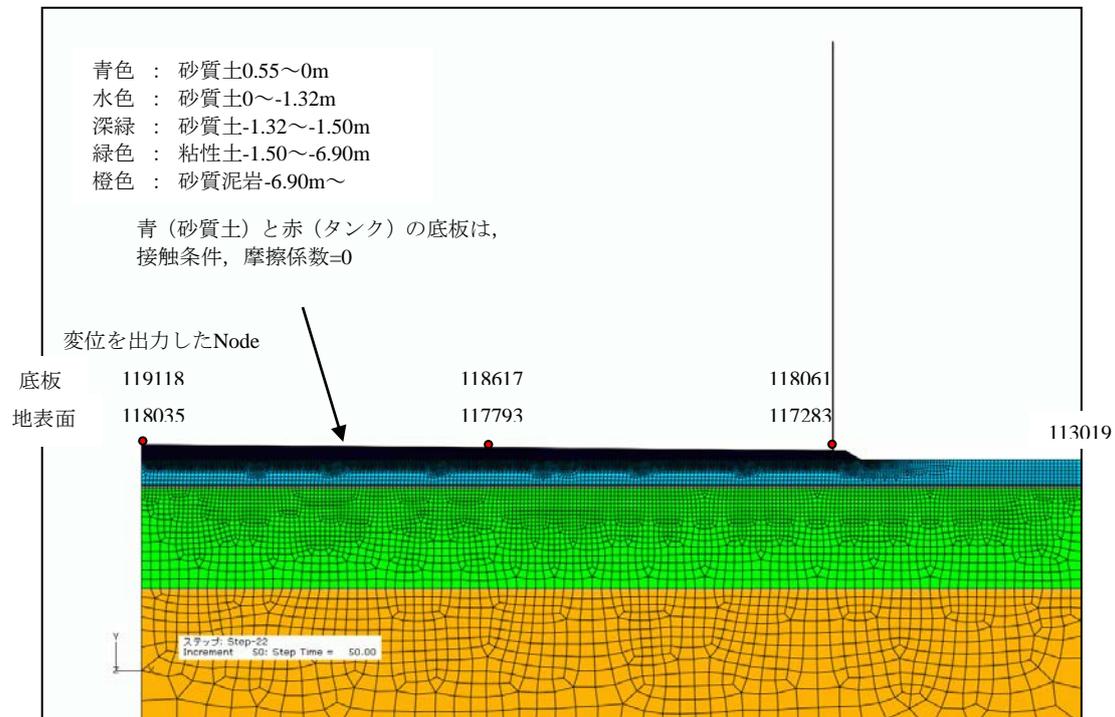


図 5.21 解析メッシュの拡大図と沈下量を注目した節点位置

水張水位と地表面の沈下量を図 5.22 に示す。

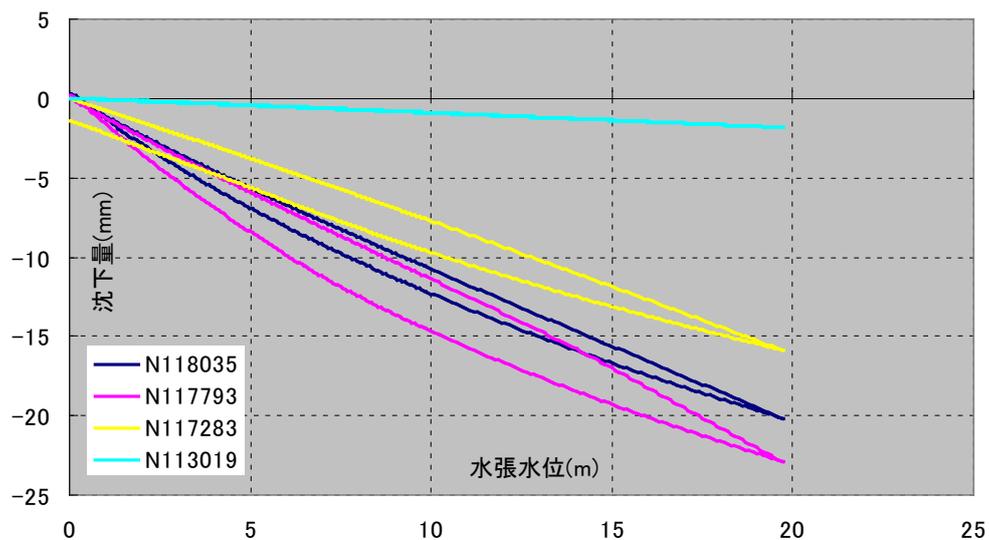


図 5.22 水張水位と地表面の沈下量の関係

b) 底板沈下量の分布

底板沈下量の径方向の分布を、図 5.23 (注水時)、図 5.24 (排水時) に示す。

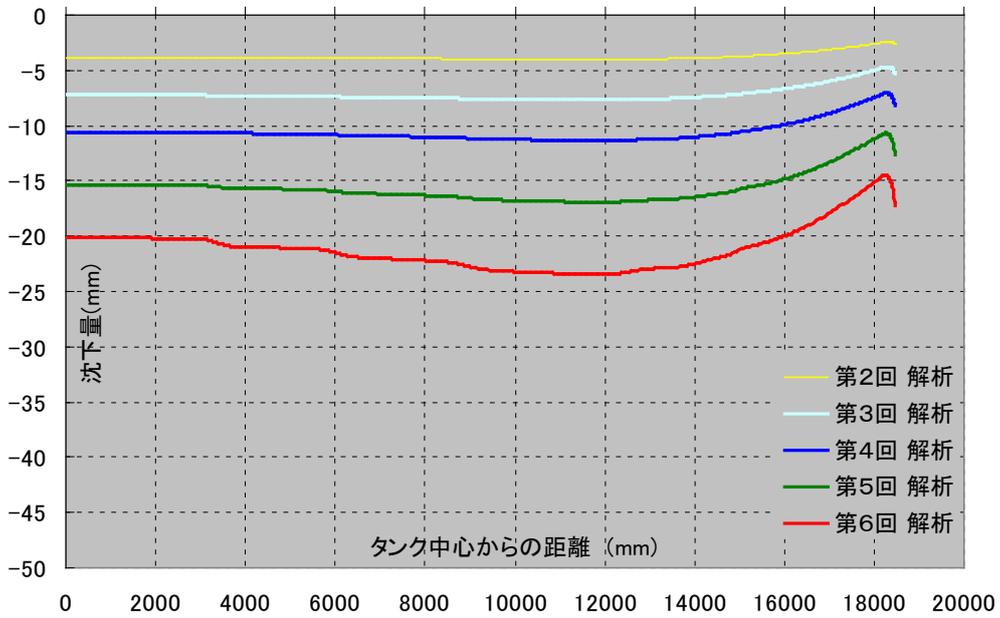


図 5.23 底板沈下量の分布 (注水時)

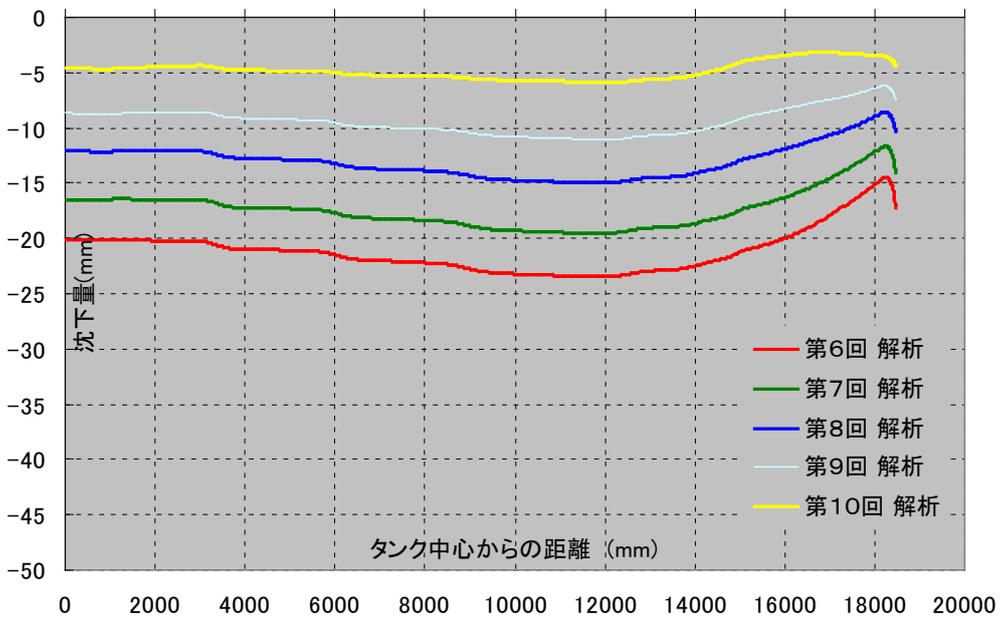


図 5.24 底板沈下量の分布 (排水時)

c) 水張時沈下量との比較

FEM 解析結果と計測された底板沈下量、外周沈下量の平均値を比較し図 5.25 に示す。

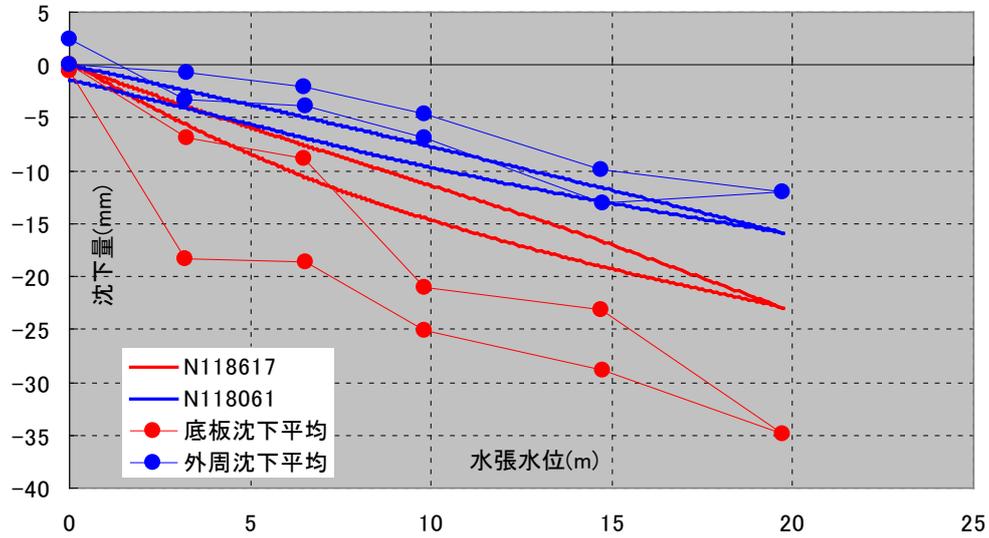


図 5.25 FEM 解析結果と底板沈下量，外周沈下量の比較

底板沈下量の径方向の分布を、FEM 解析結果と実測値を比較し図 5.26 (注水時)、図 5.27 (排水時) に示す。

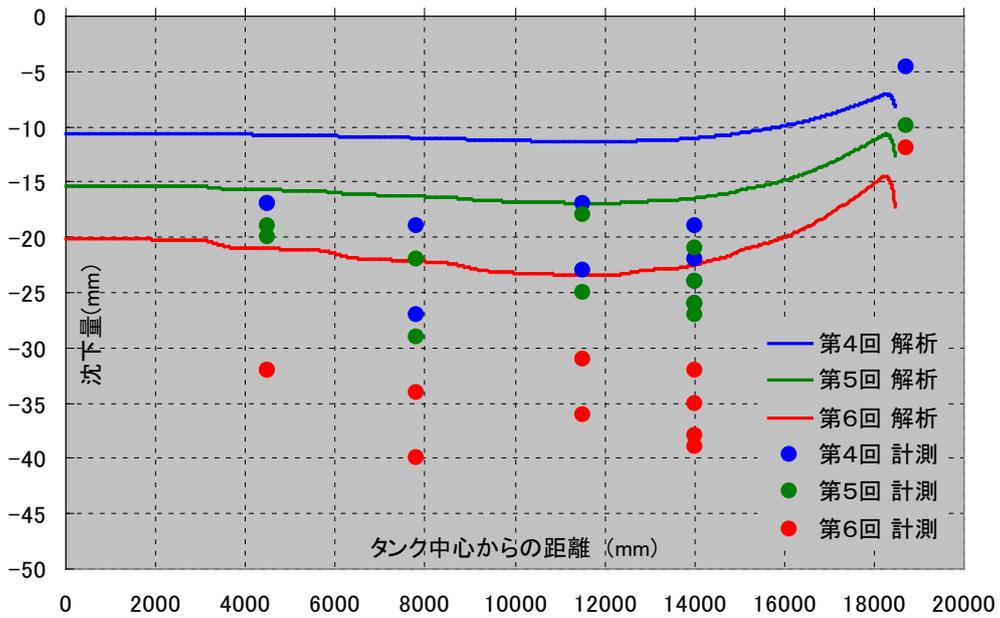


図 5.26 FEM 解析結果と底板沈下量，外周沈下量分布の比較 (注水時)

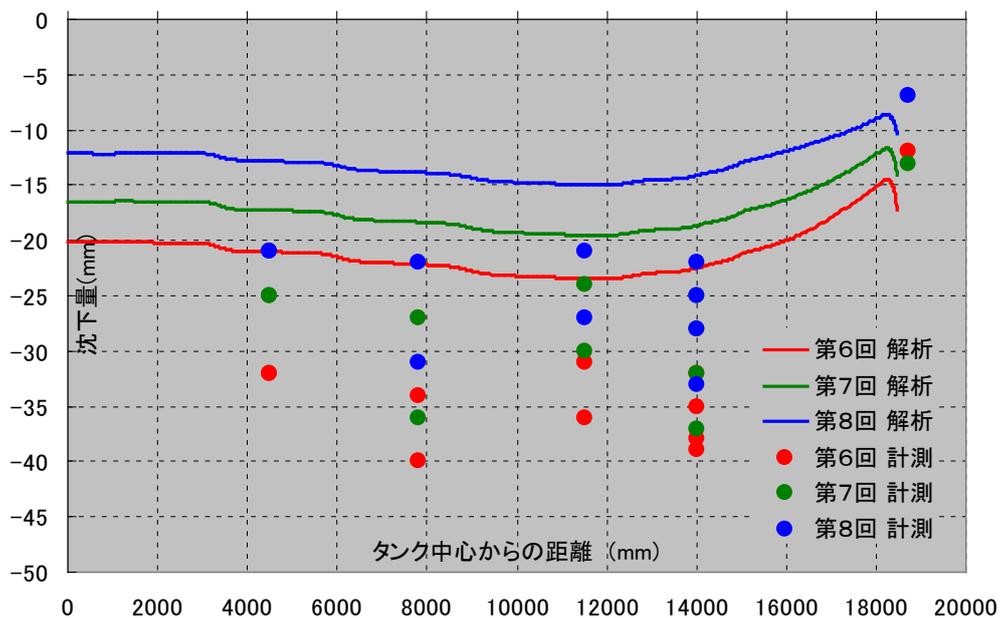


図 5.27 FEM 解析結果と底板沈下量，外周沈下量分布の比較（排水時）

第6章 まとめ

6.1 水張試験時の底部鉛直方向変位計測のまとめ

タンク内部の沈下量を測定する方法として、今回仮ベンチマークをタンク内に設置しレベル測量と鋼巻尺を利用した測定方法を用いた。レベル測量の結果を用いて、レーザーレベル計やタンクスケールを併用することで、タンク底板の沈下量を算出し、水張試験時の底板の挙動を分析した。

変位計測結果から、水張試験における低水位段階において底板の変位量が大きく、空液時においてはタンクの底板と地盤基礎面が密着していない部分（空隙）が存在することが予想される。この挙動は底板への応力負担が増大し、疲労破壊の原因ともなる。今回実施した沈下計測は、水張水位の低い段階での測定を増やすなどの工夫を行ったが、水張水位と地盤の沈下量との関係に対して空隙量が及ぼす影響について有効に評価することが可能なデータを得るまでには至らなかった。なお、タンク底板と地盤基礎面との空隙量を非破壊的に測定する技術としては、 γ 線や中性子線を使ったものが現在確認されている。

6.2 FEM 解析のまとめ

6.2.1 平板載荷試験の FEM 解析

旧法の屋外タンク貯蔵所は、設置以来貯蔵液の受入払出しを繰り返している。つまり、荷重の除荷と再載荷を繰り返しているが、除荷と再載荷における荷重と地盤の沈下量との関係は非線形的挙動となることが考えられる。今回実施した FEM 解析では、地盤各層の剛性について拘束圧依存性とひずみ依存性の両者を考慮することで、荷重と沈下量との関係の非線形性を表現することを可能とし、平板載荷試験の FEM 解析については、定量的にも良好な一致を得た。

この結果は、上述した地盤各層の剛性に関する取扱い方法に加え、初期剛性値の設定が適正であったためと考えられる。平板載荷試験のシミュレーションに用いた初期剛性値は、繰り返し三軸試験から得られた等価ヤング率から求められたものである。

6.2.2 実タンクにおける沈下シミュレーション

実タンクにおける沈下シミュレーションについて、タンク外周部の沈下量に関しては定量的にも良好な一致をみている。沈下シミュレーションの対象となったタンクの地盤は、①粘性土が卓越した地盤であること、②比較的浅い部分に硬い泥岩層が存在したこと及び③粘性土に関する圧密試験結果が存在したことが特徴として挙げられる。旧法タンク全体を沈下シミュレーションの対象とする場合、ボーリング調査における N 値のみから地盤性状を推定しなくてはならないケースや、堆積層が厚い場合における地下水位の影響が大きくなるケース等、今回の対象と比べて解析条件が悪いケースが多く存在することが考えられる。したがって、上述したような条件の悪いケースについても沈下計

測結果とシミュレーションの比較を実施していく必要があると考える。

タンク内部の沈下量については、載荷時と除荷時における水位と沈下量の関係について非線形性を再現することができたところである。一方、定量的にみれば、実測の結果が外周部の沈下量に対して平均して約 2.9 倍であるのに対して、沈下シミュレーションではそこまでの差異が出ていない。先述したとおり、空液時にはタンク底板と基礎表面との間に空隙が存在することが予想されるが、沈下シミュレーションの初期状態においてはタンク底板と地盤基礎面とは密着した状態となっていることから、実タンクにおける空液時の空隙の状況が、計測とシミュレーションの定量的な差に影響を与えているものと考えられる。こうした空隙の及ぼす影響の定量的な評価については今後検証が必要と考えられる。特に外周部に比べタンク内部の沈下量が大きいということは、底板に対して引張応力が発生する可能性があることから、これらの評価に関しては注意を要する。

6.3 旧法タンクの基礎地盤の堅固さを確認するための課題

今回実施した有限要素法のシミュレーション手法を種々の異なる性状の地盤に対して適用する必要がある。実際に計測した荷重－沈下量の関係とシミュレーション結果の定量的な検証の実施が望まれる。

一般的に容量が 1 万キロリットル以上の屋外貯蔵タンクは、その内径が概ね 30m を超えるものが多いことから、地盤の深さ方向の構成がタンクの沈下に与える影響が大きくなっていくと考えられる。従って、タンクの沈下シミュレーションを精度よく実施するためには、まずタンク設置位置の原地盤の構成及びその物性を正確に把握し、沈下シミュレーションのパラメータとして設定する必要があると考えられる。

標準貫入試験で得られた N 値から経験式を用いて推定する方法だけから正確な地盤剛性を得ることは難しいと考えられる。定量的に精度の高い沈下シミュレーションを実施することを考えた場合、弾性波探査によって得られる地盤のせん断弾性波速度 V_s や孔内載荷試験から得られる地盤剛性、さらに不攪乱試料を用いた三軸試験から得られる土の剛性および粘着力 c 及び土の内部摩擦角 ϕ 等のデータが有効となることから、こうした試験の実施を考慮することが必要である。弾性波探査や孔内載荷試験などの原位置試験と三軸試験のデータを解析して沈下シミュレーションに必要な地盤モデルを構築する場合、地盤剛性は拘束圧や生じたひずみの大きさによって変化するという非線形性があることを考慮する必要がある。

今後、これらのことを考慮して、タンク周辺地盤の地盤情報や調査から沈下シミュレーション解析に必要なパラメータとしての物性を取得する方法について、明確な考え方を示す検討も必要と思われる。

6.4 タンク底板と地盤基礎面の空隙がタンク底板の強度に与える影響について

タンク底板と地盤基礎面の空隙については、液圧の増減によって底板の鉛直方向変位量が大きく増減する要因となることから、タンク底板の溶接部に発生する応力に対する影響（低サイクル疲労破壊を含む）についても検討する必要がある。空隙の評価において重要なポイントとしては次の点が挙げられる。

- (1) 空隙の形態（基礎表面の沈下、タンク底板の浮き上がり）の整理
- (2) 空隙量が測定した沈下量と液圧の関係から逆算した地盤剛性に与える影響の把握
- (3) 空隙量がタンク底板の疲労強度に与える影響の把握

