

# 曲線掘削を用いた地下水位低下工法

ハザマ 正会員 大橋幹生

正会員 三原正哉

新日本製鐵株式会社 正会員 長谷川久

## 1.はじめに

旧消防法（昭和52年以前）で建設された石油タンク（旧法タンク）の地震時安定性向上のため法改正が行われ、平成7年1月に施行された。それにともない旧法タンクでは地盤の液状化と基礎の局所すべりに対する改修・強化が必要となる可能性がある。

新日鐵とハザマは、既存の旧法タンクの地盤の液状化対策に有効な工法として「曲線掘削を用いた地下水位低下工法」を共同で開発した。

本文では、工法の概要および試算例と開発に際して実施した各種実験の概要を示す。

## 2.工法の概要と特徴

地下水位低下工法の概要図を図-1に示す。旧法タンク下の地盤にドレーン管（鋼製スクリーン管）を敷設し、ドレーン管内よりポンプで揚水することにより地下水位を低下させ、液状化対策とする。本工法は、一般的に液状化しやすい土質全般に適用できる。ドレーン管の掘進延長は、最大150mである。

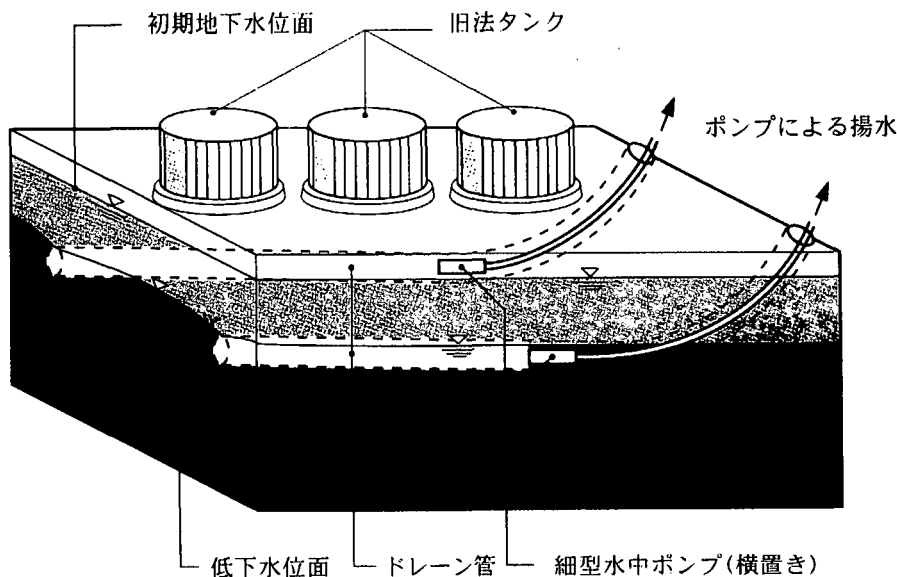


図-1 地下水位低下工法の概要

工法の特徴を以下に示す。

- ① 確実な液状化防止；地下水を低下させることにより、液状化を確実に防ぐ
- ② タンク移設の必要なし；タンクの移設なしでタンク直下の地盤の液状化を確実に防ぐ
- ③ タンク周辺機器、配管の移設不要；防油堤の外側からの施工も可能
- ④ 広範囲の一括施工；ドレーン管を水平に配置することで複数のタンクの下地盤の同時改良が可能
- ⑤ 高い安全性；火気の使用がなく、施工機械はコンパクトで転倒のおそれがないため安全性に優れる
- ⑥ 環境への影響小；施工時の騒音、振動が少なく環境へ優しい工法
- ⑦ 短工期；立坑が不要なため、短期施工が可能
- ⑧ 安価な工事費；曲線掘削工法を適用することにより立坑が不要で、工事費を安く抑える

キーワード：旧法タンク、地盤補強、既設構造物、液状化対策、地下水位低下

連絡先：〒107 東京都港区北青山2-5-8 ☎03-3405-4052 ㊚03-3405-1854

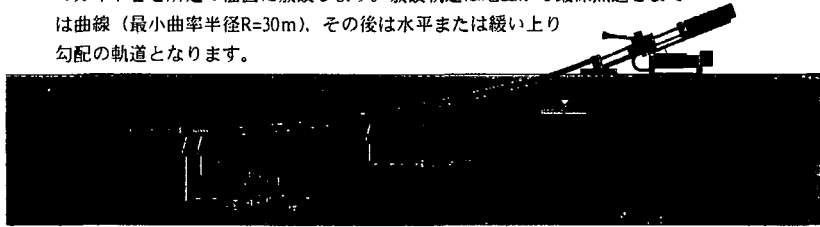
### 3. 施工および地下水位管理方法

#### (1) 曲線掘削によるドレーン管敷設方法

曲線掘削によるドレーン管敷設工法の施工手順を図-2に示す。

①機材の搬入、据付工 掘削機、泥水設備、管材、等を現場に搬入し、掘削機を所定の発進位置に設置します。

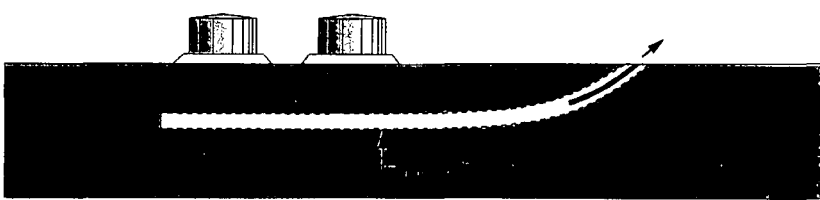
②ガイド管掘進工 すべての機材の据付けが完了した後、方向制御しながら約60mmφのガイド管を所定の位置に敷設します。敷設軌道は地上から最深点過ぎまでは曲線（最小曲率半径R=30m）、その後は水平または緩い上り勾配の軌道となります。



③ドレーン管掘進工 小口径管の軌道に沿って掘削孔を拡掘しながらφ300mmのドレーン管を地中に掘進させます。拡掘はドレーン管先端の治具（泥水JET噴射）により行われます。



④ガイド管引抜工 所定の距離だけドレーン管の掘進が完了した後、ガイド管を地上に撤去します。



⑤機材移設工、撤去 ドレーン管は通常複数本敷設するため、次の発進点位置に掘削機を設置し、②～④の工程を繰り返します。

図-2 曲線掘削によるドレーン管敷設工法の施工手順

#### (2) 地下水位管理手法

ドレーン管によって集められた地下水は、水中ポンプによって強制排水し、雨水として処理する。観測井において設計水位より高くなれば自動的にポンプが作動するシステムにより、地下水位を所定の高さに保つ。水位管理システムの概念図と平面的な水位管理システム配置計画例を図-3に示す。

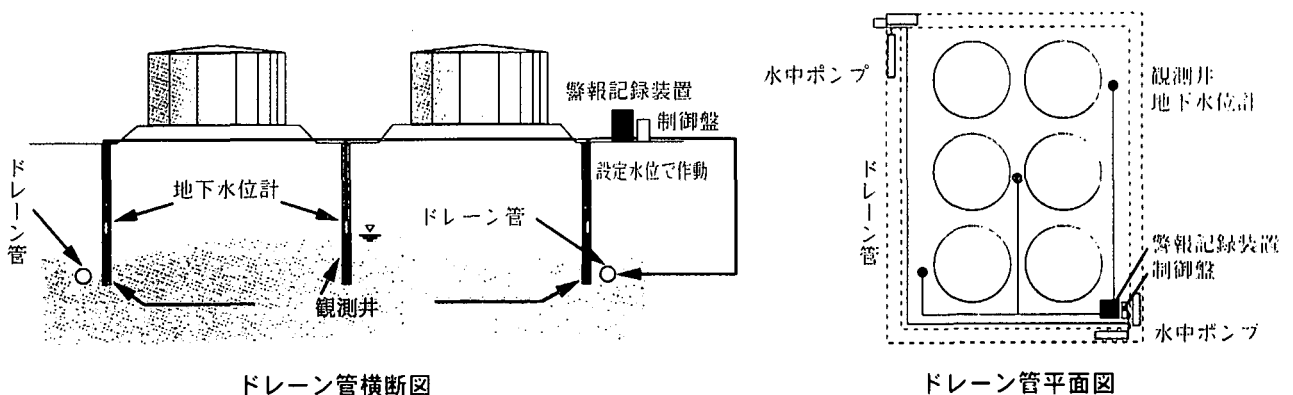


図-3 水位管理システム概念図および平面的な配置計画例

#### 4. 設計の考え方

##### (1) 設計方針

液状化判定の第二段階評価基準を満足するように、地下水位低下量を設定し、必要な排水量を確保できるポンプの選定、ドレーン管の配置計画を行う。また、排水に伴う地盤の沈下量が許容沈下量を満足することを確認する。地下水位低下工法は、図-4に示す手順で設計する。

##### (2) 液状化判定

###### ① 第一段階評価基準による判定

従来の消防法（新法）に準ずるものであり、限界N値法による判定方法を用いる。

原地盤N値が限界N値を満足していれば対策不要であり、満足していない場合は第二段階評価基準による判定を行うことになる。

###### ② 第二段階評価基準による判定

改正消防法で新しく導入されたものであり、液状化指数（PL）による判定方法を用いる。

まず、地盤の液状化強度比と地盤に地震時に発生するせん断応力比とを比較して液状化抵抗率（FL）を算定し、得られた液状化抵抗率を用いて液状化指数を算定する。図-5に液状化指数の算定式と概念図を示す。

FL値が各深度での液状化の程度を示すのに対し、PL値は地盤全体に対する液状化の激しさの程度を示すもので、深さ方向の重み係数のため浅い深度でのFL値が小さいほどPL値は大きくなる。

改正消防法では、PL値が5以上の場合に対策が必要となる。

##### (3) 地下水位低下量の設定

PL値の特性を考慮すると、浅い地層での液状化抵抗率を上げれば効果的にPL値を減ずることができる。地下水位低下工法は、この浅い地層での液状化を防止することに適した工法であり、法定のPL値5以下を満足するには、さほど大きな水位低下を必要としないものと思われる。

このため、水位低下による圧密沈下等の発生も小さく抑えることができる。

##### (4) 地下水位低下計画

地下水位低下計画においては排水量の算出、ドレーン管配置計画、ポンプ選定を実施する。

地下水位低下計画の手法として、簡易法と詳細法の2つの手法がある。

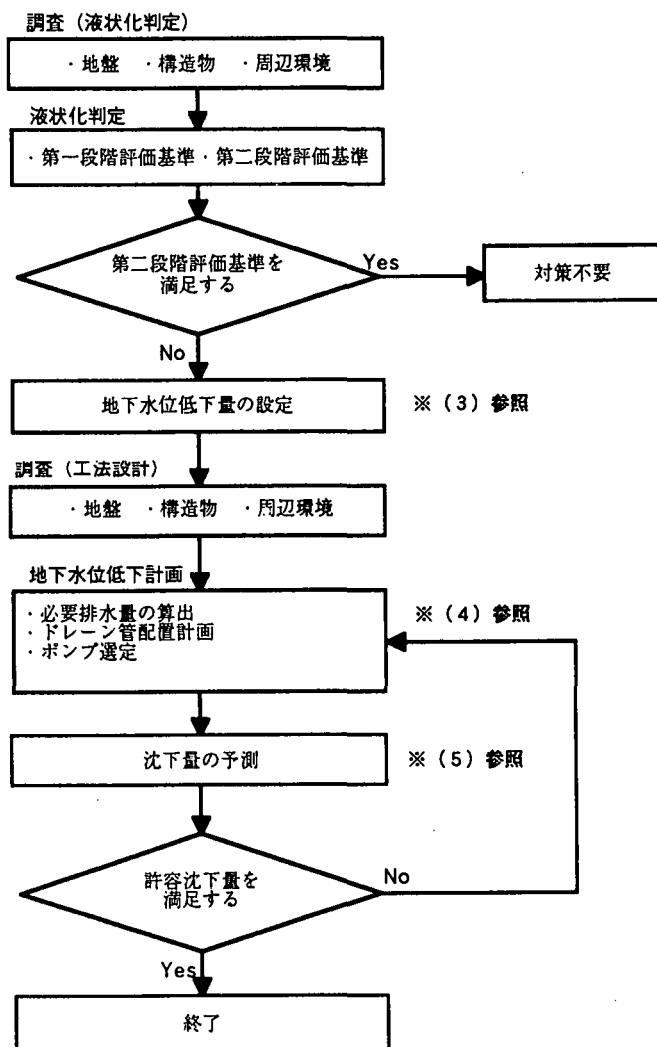


図-4 地下水位低下工法の設計手順

$$PL = \int_0^{\infty} F \cdot w(x) dx \quad \text{ただし、}$$

$$w(x) = 10 - 0.5x$$

$$w(x): \text{深さ}(x) \text{に対する重み係数}$$

$$x: \text{地表面からの深さ}$$

$$F: FL < 1.0 \text{の時 } 1 - FL$$

$$FL \geq 1.0 \text{の時 } 0$$

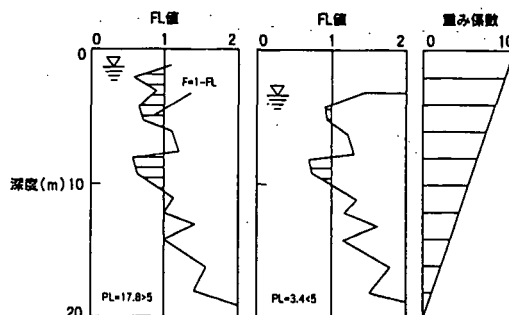


図-5 PL値概念図

① 簡易法

影響圏を考慮したドレーン管の平面配置を検討。既存設計基準によるドレーン管設置深度、設置勾配、必要排水量を算出。（「道路土工－排水工指針」での必要排水量の算出式等を適用）

② 詳細法

2次元、準3次元浸透流解析により必要排水量を算出。ドレーン管位置で流量境界とした定常・非定常浸透流解析による検討を行う。

非定常浸透流解析では、水位低下による圧密沈下、供用開始時期を考慮した排水量の算出が可能。

(5) 沈下量の予測

地下水位低下工法では、地盤沈下が問題となる場合がある。しかし、同じ原理のディープウェル工法が深い位置から局所的に揚水するのに比べ、本工法では浅い位置から全面的に水位低下させることから、極端な不等沈下は少ないものと思われる。

沈下量の予測手法として、以下に示す簡易予測と詳細予測の二つの手法がある。

① 消防法による簡易予測

告示で定められているタンク地盤沈下量の計算方法。

② 圧密解析による詳細予測

砂と粘土の互層などの地盤では1次元圧密解析で、不整形な地盤などでは2次元圧密解析で、必要に応じて時間変化を含む詳細な沈下解析を行う。

5. 設計試算例

検討モデルは、図-6に示す直径30mの6基のタンク群を想定し、図-7の地盤条件とする。不透水層はGL.-18.7m以深のシルト層とし、透水層の透水係数は、粒径などを考慮して設定する。

(1) 液状化判定と地下水位低下量の設定

第二段階評価基準に基づいた液状化判定結果を図-8に示す。埋土層および沖積砂層が液状化層と判定され、PL値は $13.26 > 5$ となる。これに対して、地下水位を現在のGL.-0.4mからGL.-2.4mに低下させると、PL値は2.83となり、基準値を満足することができる。ここでは、余裕を考慮して地下水位低下量を3.0mとする。

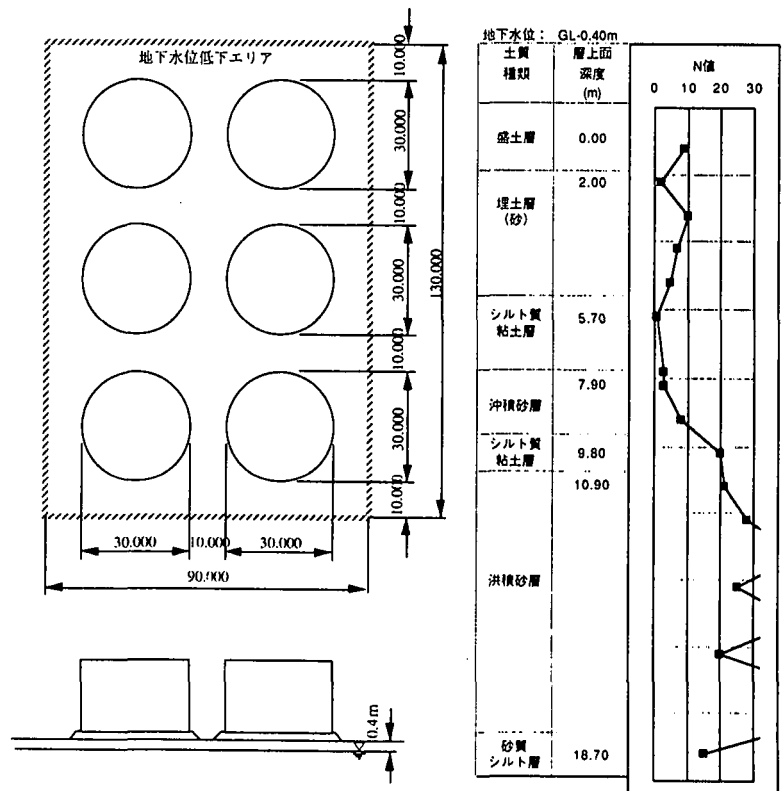


図-6 検討モデル

図-7 地盤条件

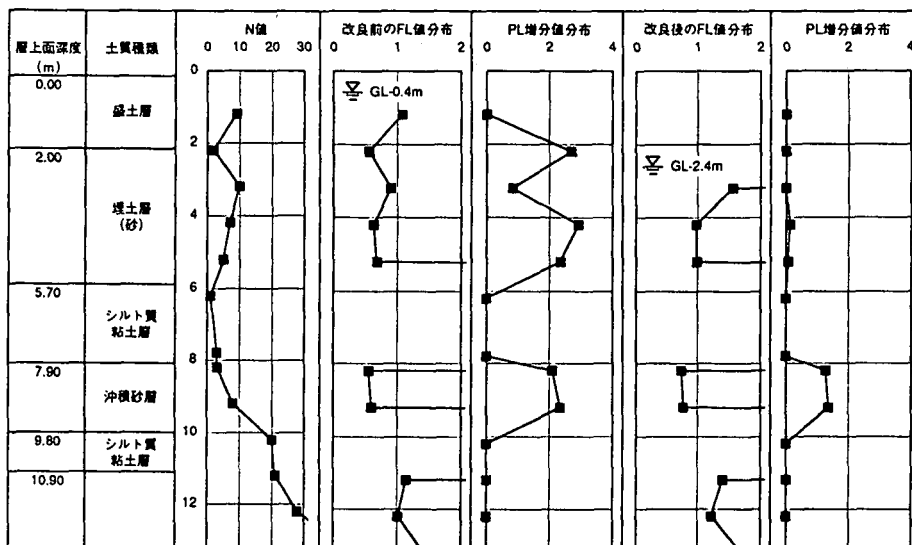


図-8 液状化判定結果

(2) 地下水位低下計画

1) ドレーン管設置深度および平面配置の設定  
ドレーン管設置深度は、ドレーン管間の最高水位が必要地下水位低下量を満足するように設定する。算定結果を表-1に示すが、設置深度はGL-4.4mとなる。

また、平面的には、ドレーン管をタンク群を囲む形に配置する。

2) 排水量の算出

長辺方向 (L=130m) と短辺方向 (L=90m) のドレーン管の必要排水量を算定する。排水量は簡易法により算定し、ドレーン管単位長さあたりおよび1本あたりの必要排水量を表-2に示す。

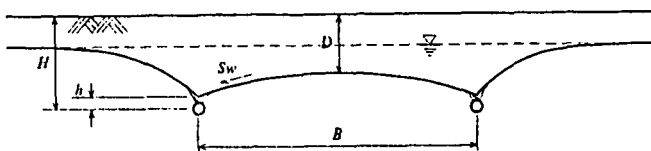
また、必要排水量を通水可能なドレーン管の仕様と可能排水量の算定結果を表-3に示す。

3) ポンプ機種の選定

ドレーン管1本あたりの必要排水量を満足する水中ポンプの選定結果を表-4に示す。

表-1 ドレーン管深度の算定

地下水面の最小勾配 $S_w$ (%)	2 砂質土
排水管付近の地下水の水深 $h$ (m)	0.1
排水管の間隔 $B$ (m)	90
地表面より低下地下水位までの深さ $D$ (m)	3.4 設計水位
排水管の設置深さ $H$ (m)	4.4



(表-1の説明図<sup>1)</sup>)

表-2 必要排水量の算定

透水係数(m/sec)	3.00E-05
不透水層上面深度(GL-m)	18.7
排水前の地下水位(GL-m)	0.4
排水管理設置位置の地下水位(GL-m)	4.4 設計水位
排水前の不透水層からの地下水位高さ $H$ (m)	18.3
配水管管理設置位置の不透水層からの地下水位高さ $h_0$ (m)	14.3
影響範囲 $R$ (m)	50
排水溝の幅の半分 $r$ (m)	0.15 管径30cm
排水溝の単位長さ当たりの片側排水量 $q$ (m <sup>3</sup> /sec/m)	2.90E-05

表-3 排水管の仕様と通水可能量

管径 $D$ (m)	0.3
管径に対する水深の割合	0.7
径深 $R$ (m)	0.089
粗度係数 $n$	0.012
水面勾配 $i$ (%)	0.2
平均流速 $v$ (m/s)	0.742
平均流量 $q$ (m <sup>3</sup> /s) (通水可能流量)	3.92E-02

	L=130m	L=90m
排水管単位長さ当たりの排水量 $q$ (m <sup>3</sup> /sec/m)	2.90E-05	2.90E-05
排水管延長 $L$ (m)	130	90
安全率 $F_s$	3	3
排水管1本当たり必要排水量 $Q$ (m <sup>3</sup> /sec)	1.13E-02	7.83E-03

表-4 ポンプの選定

	L=130m	L=90m
排水管1本当たり必要排水量 $Q$ (m <sup>3</sup> /min)	6.78E-01	4.70E-01
ポンプ排水量 $Q$ (m <sup>3</sup> /min)	1.50E+00	9.34E-01
ポンプ機種名	SP 75-2	SP 45-2

※ ポンプは、グルンドフォス社製の横置型水中ポンプ

#### 4) 沈下量の予測

地下水位低下に伴う沈下量を算定するための地盤定数と算定結果を表-5に示す。地下水位低下量が4.0m（ドレーン設置位置）と、3.0m（ドレーン管間中央位置）の位置における沈下量の差は2.2cmとなり、本検討で対象としたタンクの許容不等沈下量10cm（タンク直径の1/300）以下となる。

表-5 沈下量算定に用いる地盤定数と算定結果  
(a) 地下水位低下量 4.0m

土層名	層厚 Hg (m)	単位体積重量		平均N値 N	圧縮指数 Cc	初期間隙比 e0	降伏応力 P0 (tf/m <sup>2</sup> )	増加荷重 ΔP (tf/m <sup>2</sup> )	層別沈下量 S (m)	
		γt (tf/m <sup>3</sup> )	γt' (tf/m <sup>3</sup> )							
盛土層	2	1.65	0.85	9				0.48	0.002	
埋土層	3.7	1.85	0.85	6				3.13	0.024	
シルト質粘土層	2.2	1.6	0.6		0.798	1.986	8.8	3.54	0.016	
沖積砂層	1.89	1.85	0.85	5.5				3.54	0.017	
									沈下量	0.059

(b) 地下水位低下量 3.0m

土層名	層厚 Hg (m)	単位体積重量		平均N値 N	圧縮指数 Cc	初期間隙比 e0	降伏応力 P0 (tf/m <sup>2</sup> )	増加荷重 ΔP (tf/m <sup>2</sup> )	層別沈下量 S (m)	
		γt (tf/m <sup>3</sup> )	γt' (tf/m <sup>3</sup> )							
盛土層	2	1.65	0.85	9				0.48	0.002	
埋土層	3.7	1.85	0.85	6				2.68	0.021	
シルト質粘土層	2.2	1.6	0.6		0.798	1.986	8.8	2.68	0.000	
沖積砂層	1.89	1.85	0.85	5.5				2.68	0.014	
									沈下量	0.037

#### 6. 要素実験

##### (1) 大型せん断土槽を用いた地下水位低下工法による液状化対策効果の確認実験<sup>2)</sup>

既設旧法タンクを有する地盤の液状化対策工として地下水位低下工法の有効性を確認することを目的として大型せん断土槽（長さ4.55m、幅2.2m、高さ2.5m）を用いた模型実験を実施した。表-6に構造物と実験モデルの諸元を示す。

実験では、地表面から約20mの様な液状化層を有する地盤上に、直径が30m、高さが15mの水タンクを想定し、土槽の寸法をもとにして30分の1にモデル化を行った。実験は地下水位レベルをパラメータとし、地表面に一致する場合（ケース1）と実地盤で6m（模型で20cm）低下させた場合（ケース2）について実施した。また、地盤には珪砂5号を用い、液状化層の相対密度を約30%とした。

周波数4Hzの正弦波で5秒間、最大加速度7段階（最終約100ガル）の加振後の最終沈下量では両者には3倍の開きが見られた（図-9参照）。

さらに、発生する過剰間隙水圧は、地下水位低下時に小さくなっており、有効応力の増加を考慮すると最大過剰間隙水圧比による比較ではさらにその差は広がり、地下水位低下による液状化対策効果は十分発揮されていることが確認された。

表-6 構造物と実験モデルの諸元

項目		実物	模型
構造物	直径	30 m	100 cm
	高さ	15 m	50 cm
	平均接地圧	15 tf/m <sup>2</sup>	50 gf/cm <sup>2</sup>
地盤	液状化層厚	21 m	70 cm
	地下水位 ケ-1	0 m	0 cm
	(GL-) ケ-2	6 m	20 cm

珪砂5号			
比重 G <sub>s</sub>	2.66	最大相対密度 e <sub>max</sub>	1.106
平均粒径 D <sub>50</sub> (mm)	0.50	最小相対密度 e <sub>min</sub>	0.707
模型地盤諸元			
	液状化層 ケ-1	液状化層 ケ-2	非液状化層
乾燥単位体積重量 ρ <sub>s</sub> (tf/m <sup>3</sup> )	1.347	1.331	1.368
間隙比 e	0.974	0.998	0.807
相対密度 D <sub>r</sub> (%)	33	27	75

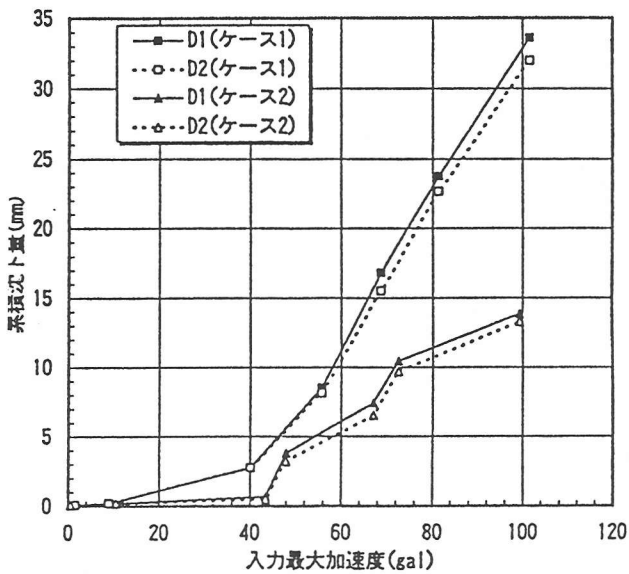


図-9 加振後の累積沈下量

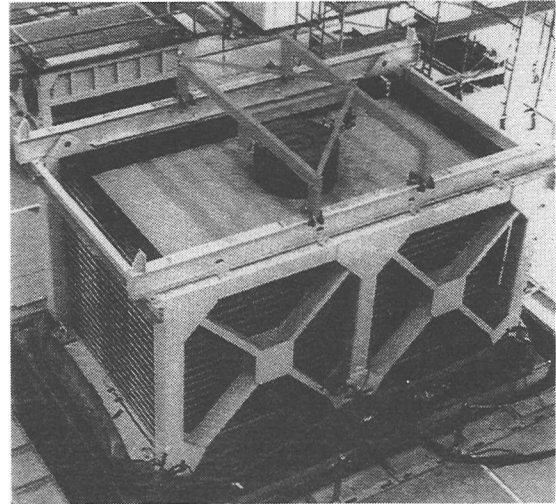


写真-1 大型せん断土槽を用いた実験状況

(2) ドレーン管スクリーンの目詰まり試験

曲線掘削により削孔、設置したドレーン管（鋼製スクリーン管）の目詰まりによる透水性の低下、地山土砂の流出、敷設時の泥水の長期的影響等の項目について検討するための実験を行った。実験装置は、上流側タンクから脱気水を下部にスクリーンをセットした供試体（厚さ90cm、直径30cm）に透水させ、水頭差をもった下流側タンクへ流下させるものである。動水勾配は中砂地盤で水位を3m低下させた場合の想定で実施した。

その結果、スクリーンの目詰まりは見込む必要がないこと、土砂の長期的な流出がないこと、および敷設時の泥水によりわずかな透水係数の低下はあるものの設計上無視できることなどがわかった。

泥水を圧入した場合の試験結果を図-10に示す。

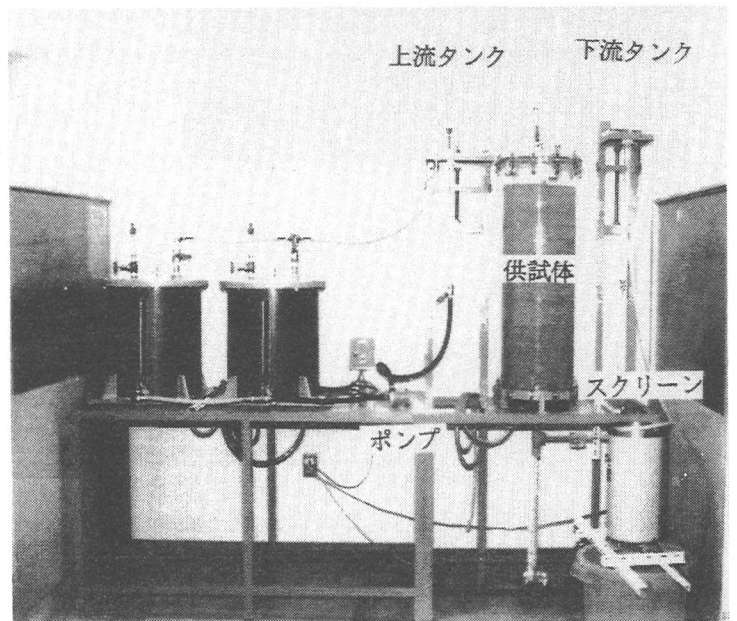


写真-2 目詰まり試験装置

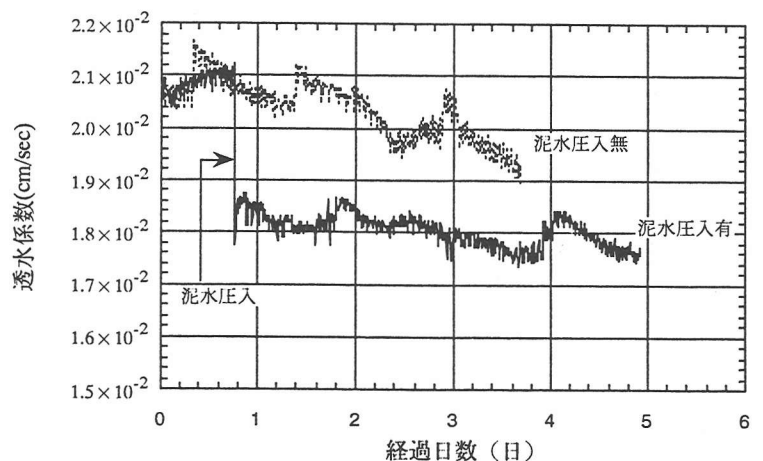


図-10 目詰まり試験結果

### (3) ドレーン管の強度試験

ドレーン管として用いる鋼製スクリーン管の強度試験（曲げ、引張）を行い、曲線掘進工法への適合性を確認した。その結果、同口径の鋼管（ $\phi 318.5$ 、 $t=6.9\text{mm}$ ）に比べ柔軟で曲がりやすく、20トンを超える引張荷重に対しても塑性変形せず、十分に曲線掘削工法に適合すると判断された（図-11参照）。

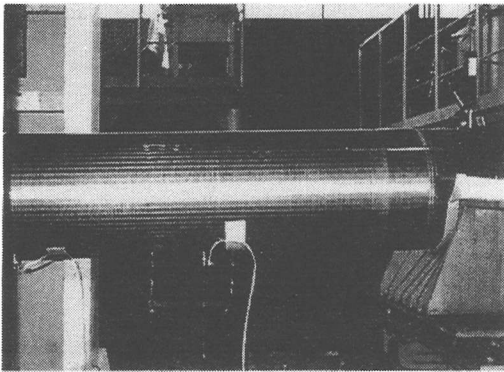


写真-3 曲げ試験状況

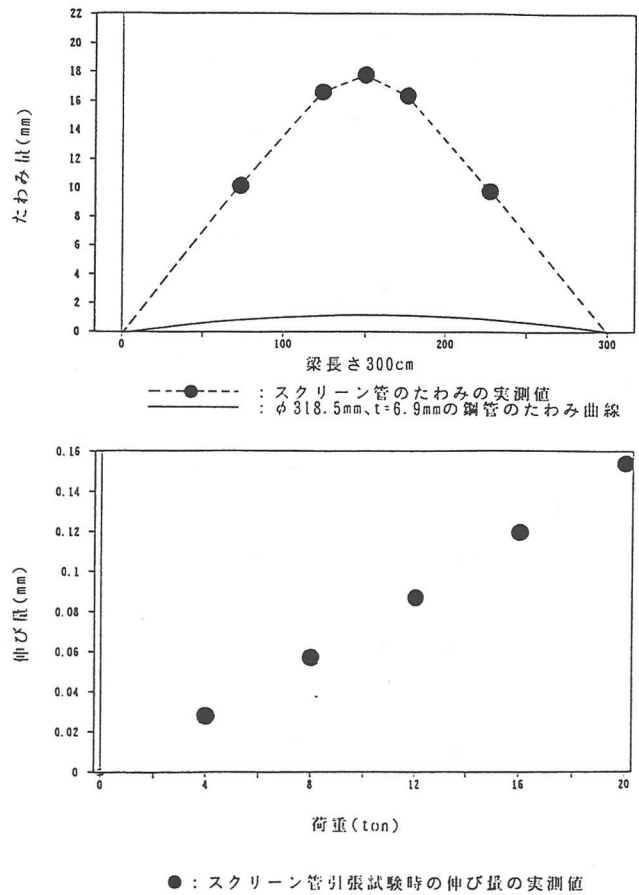


図-11 曲げ試験（たわみ曲線）・引張試験（伸び量）の結果

### (4) ドレーン管掘進用 J E T 噴出治具の噴出確認試験

ドレーン管の掘進敷設時に用いる J E T 噴出治具の噴出特性を把握するために試験を行い、ドレーン管の掘進敷設に適用可能であることを確認した。

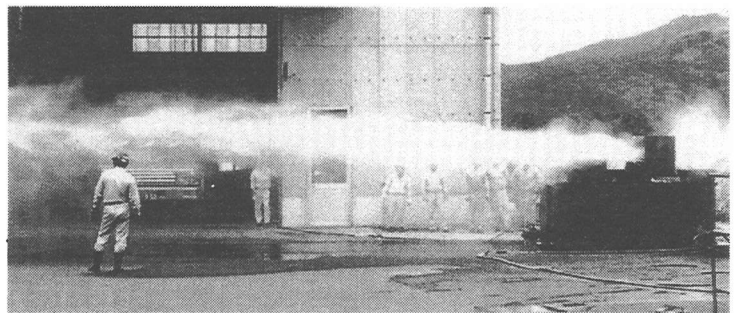


写真-4 J E T の噴出状況

## 7.まとめ

液状化対策として地盤内の地下水位を低下させることは、地盤内で発生する過剰間隙水圧および旧法タンク等上部構造物の沈下の低減に非常に有効であることは理論的にも容易に理解でき、実験レベルでも確認できた。今後、実地盤での適用に向けて、さらに大がかりな実証実験やそれに基づく精度の高い解析を行い、沈下量の定量的な把握や最適なドレーン配置設計を可能としていく予定である。

## 引用文献

- 1) 「道路土工－排水工指針」 (S.62.5、(社)日本道路協会)
- 2) 「大型せん断土槽を用いた地下水位低下工法による液状化対策効果の実証実験」 (H.7.9、第50回年次学術講演会)