

VI-2 深層混合処理工法による大型燃料タンク改良基礎地盤の挙動解析

北海道電力(株) 正会員 白川部 秀 基
 " " 高 橋 耕 平
 北 電 興 業(株) " 能登谷 勇 人
 飛 島 建 設(株) " 南 邦 明

1. はじめに

知内火力発電所2号機増設工事に伴う大型燃料タンク基礎の地盤改良に、北海道電力(株)では我が国で初めて本格的な深層混合処理工法(以下CDM工法と呼ぶ)を実施した。

CDM工法は現在地盤改良工法として広く用いられているが、大規模なタンクへの施工実績がないなかで、当タンク基礎は既往の基準・指針に準拠して設計・施工を行い、平成7年9月に消防法に基づく完成検査前検査のうち燃料タンク基礎・地盤検査、平成8年7月に水張試験を無事終了し、特定屋外貯蔵タンク基礎の地盤改良としてCDM工法の適用が十分可能であることが明らかになった。しかし、CDM改良地盤の長期的な挙動や地震時の挙動については十分に把握されておらず、また、類似工事への適用にあたっての改良深度や改良率の低減等の経済性の検討が課題となっている。

そこで、今回水張試験における各種計測結果を基に、CDM改良地盤および周辺地盤の物性値の同定、挙動解析を実施しタンク基礎の安全性を再検討した。また、改良深度の相違が改良地盤や周辺地盤に与える影響について検討した。

本報告は改良地盤およびその下部に計測器を埋設し、水張試験時に各種計測を行ったNO. 4タンクを対象に改良地盤および周辺地盤をモデル化し挙動解析を行った結果をまとめたものである。

2. 燃料タンク基礎地盤の概要

図-1にNO. 4タンクの地質断面図を示す。地盤改良の対象土層となる沖積層は地表部から盛り土(Bk層)、泥炭層(Ao、As層)、砂質土層(As層)、そして極めて軟弱な粘性土層(Ac層)が分布している。実施工においては泥炭層を盛り土に置き換えて行ったため、CDM工法における地盤改良はBk層、As層、Ac層を対象としている。その下部には支持地盤である洪積層が分布しており、上部から改良体の着定層とした比較的締まっている砂礫層(Dsg-1層)、事前の土質調査の結果から有効土被り圧に対し、過圧密状態にある粘性土層(Dc層)、その下部にはN値50を超える非常に締まった砂礫層(Dsg-2層)が分布している。

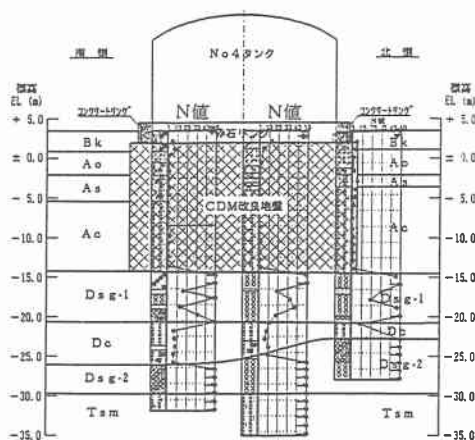


図-1 地質断面図 (No. 4タンク)

3. 同定解析

(1) 解析モデル

解析モデルは改良地盤の形状(円柱状)を考慮して三次元的な円形状の奥行きが擬似的に表現できる、図-2に示すような軸対象モデルとした。解析範囲はタンク中心線から水平方向に150m、鉛直方向は砂質シル A numerical analysis on the behavior of large fuel tank foundation stabilized by cement deep mixing method by Hideki Shirakawabe, Kohei Takahashi, Hayato Notoya and Kuniaki Minami

ト岩 (Tsm 層) を基盤面とし洪積砂礫層 (Dsg-2 層) まで約 32m とした。境界条件は底面固定、側方鉛直ローラーとし、タンクおよび内容水は碎石マット上面に等分布荷重として載荷した。

各地盤の変形係数の初期値は表-1 に示すように定めた。改良体は材令 91 日におけるボーリングコアによる一軸圧縮試験、下部地盤および周辺地盤は孔内水平載荷試験、碎石リングは平板載荷試験からそれぞれ求めた。

また、CDM改良地盤全体の変形係数は改良部と未改良部の変形係数に改良率 (78.5%) を考慮した一様な地盤とした。

(2) 解析方法

同定解析の初期値 (変位、応力、ひずみ) はタンク掘付完了時の値とし、水張荷重の増分に伴う相対変位量 (鉛直・水平) を対象として、各地盤の変形係数を逆解析直接法で求めることとした。同定対象とした地盤のパラメータ (変形係数) 数が 12 個と多いため、各土層の変形係数の大きさに着目して、全体を CDM改良地盤、碎石マット、下部地盤及び周辺地盤の 4 つにグループ分けし (表-1)、各グループの剛性増加率を同定することとした。

また、CDM工法の施工の特性 (非排土式) および水張試験による沈下量測定結果等から、CDM改良地盤側面には周面摩擦力が働いていることが推測された。そこで、本解析においてもその影響を考慮するため、以下の 2 つの状態を解析過程で組み合わせることとした。

状態①摩擦力を考慮した状態 (改良地盤と周辺地盤の境界部の接点を剛結させるモデル)

状態②すべりを考慮した状態 (改良地盤と周辺地盤の境界部の接点を 2 重の接点とするモデル)

状態①から状態②への移行する荷重レベルの判断としては、図-3 に示す燃料タンク側板における沈下量実測結果の沈下曲線の勾配が水位約 15m 付近で増大することから、このときの荷重が周面摩擦力の作用する限界荷重となっているものと想定し、その水位相当荷重の 30,000t (1.3t/m²) とした。ちなみに、この周面摩擦力の値は既往のデータ (粘性土については $c=1.9\sim4.6\text{tf/m}^2$ 、砂質土については $c=5\text{tf/m}^2$) を用いて計算した値のほぼ 3 倍に相当する。

(3) 解析結果

同定解析から最終的に設定した変形係数を表-1 に示す。同定した変形係数は各地盤とも現地試験の結果から設定した初期値より大きくなっている。その理由として、下部地盤、周辺地盤の変形係数の初期値は、孔内水平載荷試験から設定したが、この試験法については孔壁の乱れや応力開放の影響で変形係数を過小価

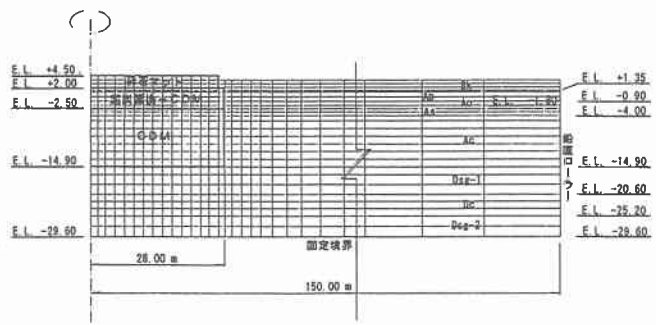


図-2 解析モデル

表-1 物性値

土 質		初期値 $E_s(\text{tf/m}^2)$	同定値 $E_s^*(\text{tf/m}^2)$	増加率	ポアソン比
CDM改良地盤	CDM(Bk)	126,000	226,800	1.8	0.33
	CDM(As)	140,000	252,000		0.33
	CDM(Ac)	136,000	244,800		0.33
	碎石マット	4,220	10,130		0.33
下部地盤	Dsg-1	2,100	6,930	3.3	0.33
	Dc	710	2,340		0.45
	Dsg-2	2,800	9,240		0.33
周辺地盤	Bk	400	480	1.2	0.33
	Ad	200	240		0.45
	Ao	200	240		0.45
	As	250	300		0.45
	Ac	250	300		0.45

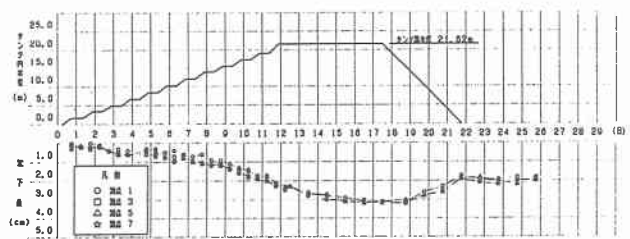


図-3 No.4タンク沈下量測定結果 (側版)

することが一般的に指摘されている。このため、既往文献等を調査し同種地盤の変形係数と比較してみたが、今回の同定値はほぼ妥当なものと判断できる。

また、一軸圧縮試験から変形係数の初期値を設定した改良地盤についても、以下のことからその同定値は妥当なものと考えられる。

①セメント改良土の微小ひずみレベル ($\varepsilon < 0.01\%$) での変形係数は、一軸圧縮試験で得られる変形係数 E_{50} より大きな値を示すということが、これまでの研究報告等からも指摘されている。

②三田地らの報告によると、局所変位測定装置 (L.D.T) を用いて測定した一軸圧縮試験における、セメント改良砂質土の E_{max} ($\varepsilon < 0.002\%$ における変形係数) は E_{50} の約 1.5 倍になる。(今回は 1.8 倍)

また、CDM改良地盤および地表面の沈下量の解析値と計測値の比較を表-2に、周辺地盤の沈下量の比較を図-4に、タンク側版直下におけるCDM改良地盤および下部地盤の水平変位の比較を図-5に示す。

これらから、今回の同定解析結果は水張試験時におけるタンク基礎地盤の実挙動をよく表現しており、CDM改良地盤側面に働く荷重レベルに応じた周面摩擦力を考慮した今回の解析モデルの選定もほぼ妥当だといえる。

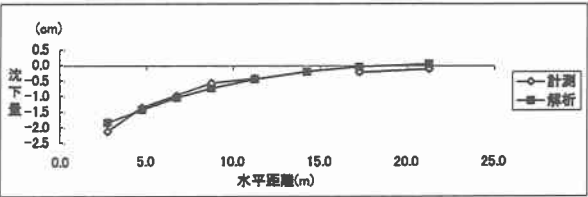


図-4 周辺地盤沈下量比較図

表-2 CDM改良地盤および地表面沈下量比較

改良地盤	計測	解析
CDM	0.10	0.09
地表面	0.09	0.10
タンク側壁部	3.11	3.08
RCリング	2.85	2.81

(cm)

4. 施工ステップ解析

CDM改良地盤、下部地盤および周辺地盤の安全性は、前項の同定解析で得られた変形係数を用いて図-6に示す施工ステップを考慮した解析で評価した。

図-7に最終ステップ(燃料充填時)における全体変形図を示す。改良地盤自身の沈下量(圧縮量)は下部地盤、周辺地盤に比べ非常に小さく、タンク基礎全体の沈下量を支配するのは主に下部地盤である。したがって、設計時には改良地盤のみならず下部支持地盤の物性等を十分に調査しておくことが必要である。

また、下部地盤のDc層が沈下に伴い側方に1cm弱変位しており、その影響が周辺地盤にも及んでいる。

周辺地盤は改良地盤との摩擦の影響

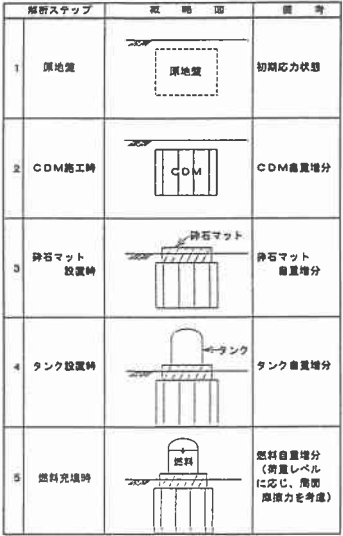


図-6 解析ステップ

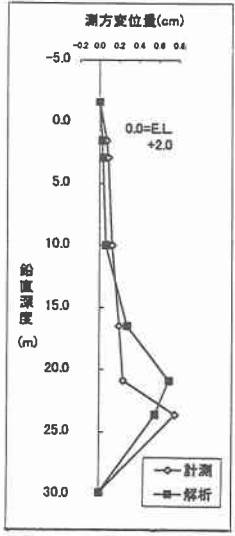


図-5 水平変位比較図

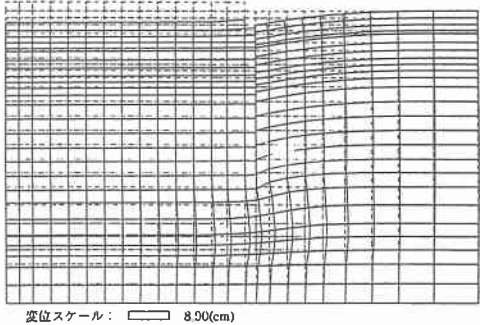


図-7 全体変形図

で引きずられるように沈下しており、その影響範囲は約15mとなっている。

図-8、9にCDM改良地盤の内部応力コンター図を示す。圧縮応力はCDM側壁下端で80tf/m²を越える大きな値を示すが、引張応力は発生していない。

また、表-3に本解析におけるCDM改良地盤の基準強度と最大応力およびその安全率を示す。改良体の基準強度(Fc)は材令91日におけるボーリングコアによる一軸圧縮強度の平均値($q_{uf}=45.15\text{kgf/cm}^2$)と標準偏差($\sigma=18.15\text{kgf/cm}^2$)から $F_c=27.0\sim63.3\text{kgf/cm}^2$ となるが、安全側の27.0kgf/cm²とし、さらに改良率(78.5%)を考慮して21.20kgf/cm²とした。

これより、圧縮応力は安全率2.5以上を示していることから、CDM改良地盤の安全性は確保されているものと考えられる。

図-10に周辺地盤のせん断破壊に対する安全率コンター図を示す。コンターの分布が整層となっており、部分的な応力集中による安全率の低下もなく上載荷重が適当に下部地盤に伝わっており、周辺地盤の安全性も確保できているものと考えられる。

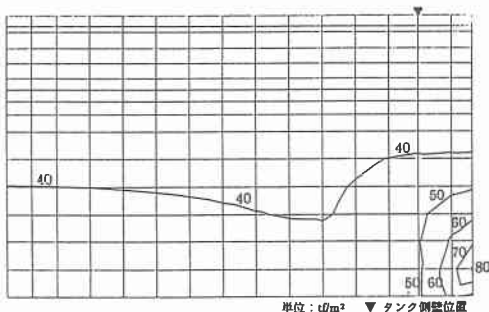


図-8 改良地盤内部応力コンター図(σ1)

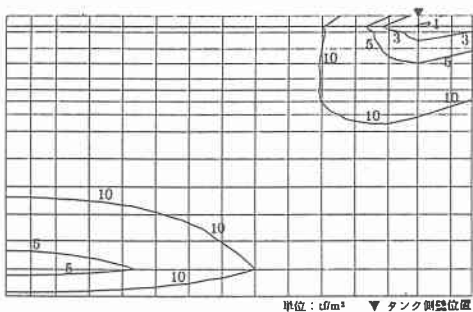


図-9 改良地盤内部応力コンター図(σ3)

表-3 最大応力と安全率

	最大応力 (kg/cm ²)	安全率	基準強度 (kg/cm ²)
圧縮	8.43	2.51	21.20
引張	—	—	3.18
最大せん断	2.65	4.00	10.60

$$\text{圧縮}(\sigma_c) = F_c \times 0.785$$

$$\text{引張}(\sigma_t) = 0.15 \times \sigma_c$$

$$\text{せん断}(\tau) = 1/2 \times \sigma_c$$

5. 改良深度の相違による各地盤の挙動の試算

前項の施工ステップ解析の結果から当発電所燃料タンク基礎の安全性は検証されたといえる。本項では、CDM地盤改良の深度と形状による挙動の変化を把握するため試行的に図-11に示すように改良深度を変化させた2パターンに対して前項と同様な手法により試算した。パターン1は改良深度を現状の約半分(E.L.-6.7mまで)とした場合、パターン2は側方下端部を未改良とした場合であり、改良率は現状と同様に78.5%とした。図-12に全体変形図、図-13、14に内部応力コンター図、図-15に周辺地盤のせん断破壊に対する安全率コンター図、表-4に圧縮、引張の最大応力とその安全率を示す。

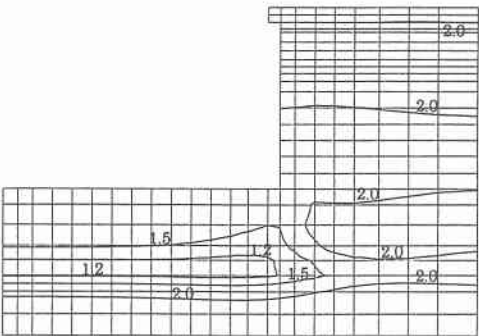


図-10 周辺地盤安全率コンター図

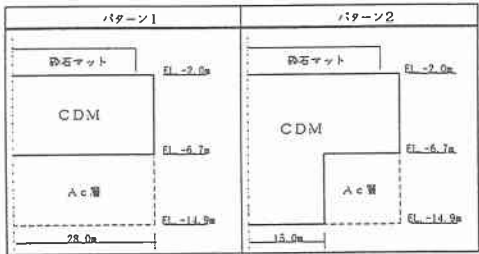


図-11 改良深度別検討パターン

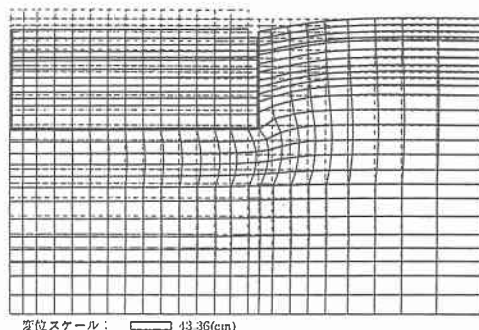
①パターン1

沖積層下部が未改良であることから、沈下が20cm程度生じている。また、CDM内部応力については側部下端および中央上面位置に大きな圧縮応力領域が生じ、中央下端および側部上端のかなり広い範囲に引張応力が発生している。安全率に関しては、圧縮に対して3.0を僅かに下回る程度であるが、引張応力が大きく安全率1.0を下回る結果となる。従ってこのような形状で地盤改良する場合は、例えば更に高い強度の材料を使用する等の対処が必要である。

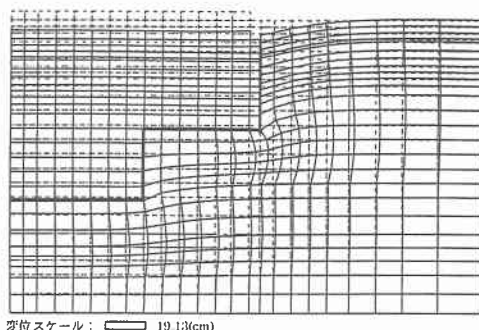
②パターン2

沖積層が一部未改良であることから、変形はここで大きく現れており、中心部は沖積層全層を改良しているため、全体の沈下量は改良パターン1に比べ半分程度に抑えられている。また、CDM内部応力は、全体的に折れる傾向から側部下端で圧縮応力が、中心上面で引張応力が卓越した状態にある。安全率に関しては圧縮で1.6、引張で1.2程度と小さい。また、CDM下部地盤のAc、Dc層で安全率が局部的に低くなっている部分がある。従ってこのような形状を採用するにあたっては下部地盤の物性を精度よく評価し、さらに改良体の強度を高める必要がある。

以上の検討結果から、今回の当発電所燃料タンク基礎の地盤改良範囲は常時安全性を確保する上で最適であったと考えられる。

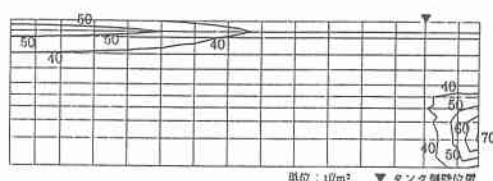


(パターン1)

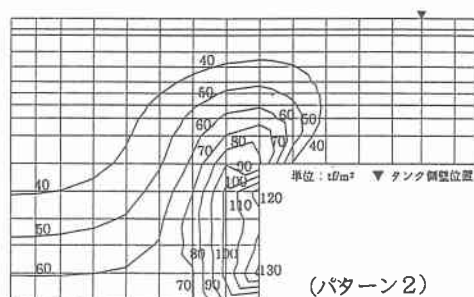


(パターン2)

図-12 全体変形図

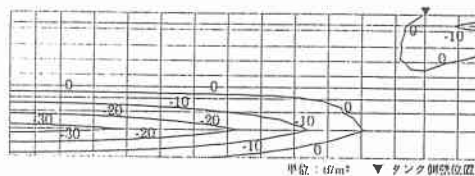


(パターン1)



(パターン2)

図-13 改良地盤内部応力コンター図 (σ_1)

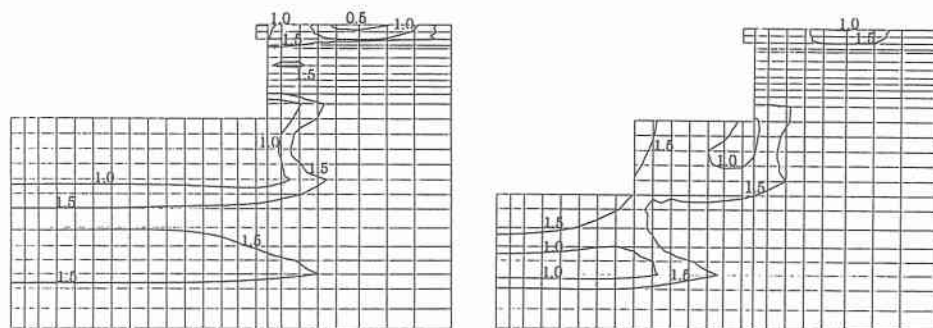


(パターン1)



(パターン2)

図-14 改良地盤内部応力コンター図 (σ_3)



(パターン1)

図-15 周辺地盤安全率コンター図

(パターン2)

表-4 最大応力と安全率

	最大応力 (kg/cm^2)		安全率		基準強度 (kg/cm^2)
	パターン1	パターン2	パターン1	パターン2	
圧縮	7.21	13.30	2.94	1.59	21.20
引張	3.41	2.66	0.93	1.20	3.18
最大せん断	3.45	5.03	3.07	2.11	10.60

6. おわりに

今回、水張試験の計測データを基に同定解析から求めたCDM改良地盤、下部地盤および周辺地盤の変形係数は、これまでの研究報告から見てもほぼ妥当な範囲にあり、この同定値を用いた施工ステップ解析の結果からCDM工法を採用した当タンク基礎の安全性が検証された。また、解析の結果、周辺地盤地表面変位に着目すれば、CDM改良地盤側面には当初の予測よりかなり大きな周面摩擦力が働いていることが分かった。さらに、改良深度の検討を行った結果、今回の洪積層を支持層とし、沖積層を地盤改良した今回の設計が適正であったことが確認できた。

今後は地盤とタンク本体の動的相互作用を考慮した解析を実施し、地震時の検討を含めた設計手法の確立、および改良率の低減効果の把握による経済的な改良率の検討を行いたい。

最後に、本解析を実施する際に終始ご指導いただいた北海道大学工学部三田地教授ならびに関係各位に感謝の意を表すものである。

参考文献

- 1) 小澤裕、澁谷啓、三田地利之：セメント改良砂質土の強度・変形特性に及ぼす有効拘束圧の影響、土木学会 第50回年次学術講演会報告集
- 2) 岩佐英昭、宇野誠、白川部秀基、関輝義、久保慎一：燃料タンク基礎への深層混合処理工法の採用について 地盤工学会北海道支部技術報告集第36号 pp163～172
- 3) 鈴木正一、高橋耕平、白川部秀基：深層混合処理工法を採用した大型燃料タンク基礎地盤の挙動 電力土木、No. 266, 1996. 11, pp. 80～87