

軟着底構造による海上発電所の地震時挙動について (Phase2: 有効応力解析)

東 均¹・興野俊也²・大熊義夫¹・足立正信¹

¹ 東電設計株式会社 (〒110-0014 東京都台東区東上野 3-3-3)

² 東京電力株式会社 (〒230-8510 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町 4-1)

過剰間隙水圧の上昇や消散を考慮可能な有効応力解析手法に基づく地震応答解析手法を用いて、地盤条件、地震動レベルなどをパラメータとし、軟着底構造による海上発電所の地震時挙動を検討した。

液状化対策工を考慮することにより、地盤系及び函体、発電設備の最大水平加速度は大きくなり、函体に対する発電設備の最大水平相対変位も大きくなっている。レベル 1 地震動(300gal)の場合、地盤の液状化層において液状化がほとんど発生せず、全体の変形量も小さい結果となった。これに対し、レベル 2 地震動(620gal)の場合、液状化層は全域に渡り液状化が発生し、函体直下地盤は不等沈下、函体側方地盤は不等な隆起が起る結果となっている。

Key words: Soft-landing, effective stress analysis, liquefaction

1. はじめに

首都圏の臨海部は既に高度に利用されており、環境保全に配慮した火力発電所の適地を選定することは将来一層困難になると予想される。そこで、宮本ら^{1) 2)}は新たな発電所立地構想として、海上にバラストタンクを有した函体を設置し、多層化した函体内部に発電設備を設置する事で占有面積の縮小を図り、バラスト調整をすることで軟弱地盤に対する接地圧をする「水面下空間利用型海上火力発電所」を提案している。近年、液状化問題に関して、有限要素法による二次元有効応力解析で検討されるようになってきている。本研究は、有効応力解析プログラム STADAS II³⁾を用いて、軟着底構造による海上発電所の地震時挙動及び地震後の圧密沈下について検討した。

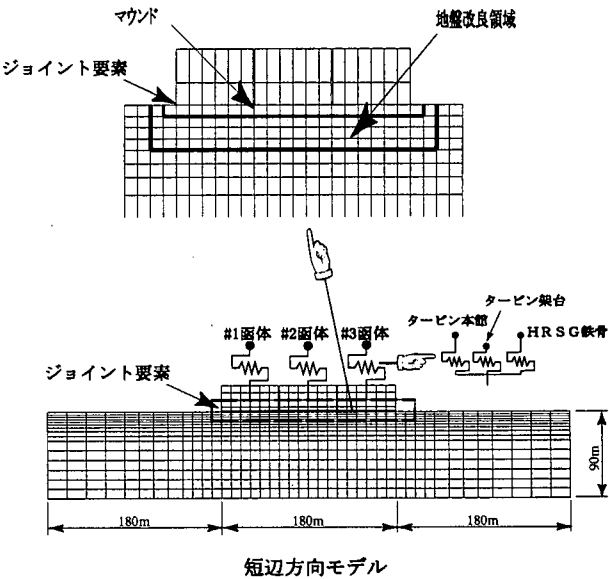


図 1 解析モデル

2. 解析条件と解析ケース

二次元有効応力解析に用いた解析モデルを図 1 に示すが、函体の諸元や入力地震動などの諸解析条件は、「軟着底構造による海上発電所の地震時挙動について (Phase1: 全応力解析)」⁴⁾の全応力解析と同じにした。ただし、解析モデルの側方の境界条件は、全応力解析の粘性境界に対し、有効応力解析

表1 地盤構成

層厚 (m)	単位体積 重量 (tf/m ³)	V _s (m/s)	ポアソン比	土質
5	2.00	250	0.45	砂質土 (N値=11)
5	1.85	300	0.45	砂質土 (N値=20)
15	1.90	375	0.45	粘性土 (N値=30)
基盤	1.90	435	0.45	砂質土 (N値=30)

表 2 解析ケース

地震動 レベル	地盤改良なし		地盤改良あり
	マウンドなし	マウンドあり	
1	ケース 1	ケース 2	ケース 3
2		ケース 4	

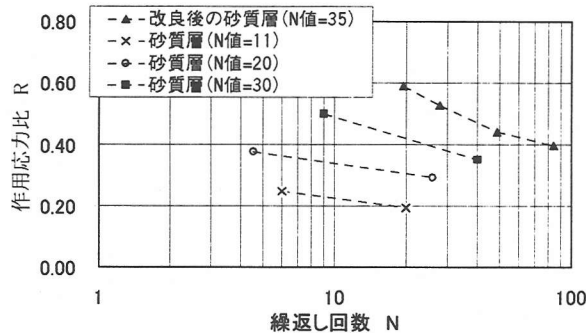


図 2 各砂層の液状化強度曲線

では地盤の液状化層の液状化挙動を追跡するための数値解析の問題から、鉛直ローラとした。

解析は、水位は HWL とし、初期応力は自重解析により、地震時については、排水条件で時間刻み 0.002sec で地震応答解析を実施した。なお、地震後の圧密沈下の影響を調べるため、地震終了後約 2 時間 30 分まで過剰間隙水圧消散の圧密沈下解析も行った。

解析に用いた地盤構成を表 1 に、解析ケースを表 2 に示す。この検討ではレベル 1 地震動に対してマウンド有無及び地盤改良有無の 3 ケースを、レベル 2 地震動に対しては、マウンドありの計 4 ケースを行った。なお、地盤改良のケースでは、最上部層の N 値=11 と 20 を N 値=35 程度に改良したものとし、またマウンドありのケースについては、函体直下地盤の最上部層の N 値=11 の 2.5m 厚さ分を N 値=35 相当の地盤改良と同等の地盤物性としている。各砂層の液状化強度曲線を図 2 に示す。

3. 解析結果

(1) 地盤改良の効果とマウンドの影響

#2 函体発電設備、#2 函体直下地盤の地表面の水平最大加速度を図 3(a)に、函体に対する発電設備の最大水平相対変位、各函体のすべり量（地盤との最大水平相対変位）を図 3(b)に示す。地盤改良なしのケースに比べ、マウンドありと地盤改良ありのケースの最大応答値はさほどの違いが見られず、函体直下のマウンドは広領域に地盤改良を行うことと同程度の効果を期待できることがわかる。

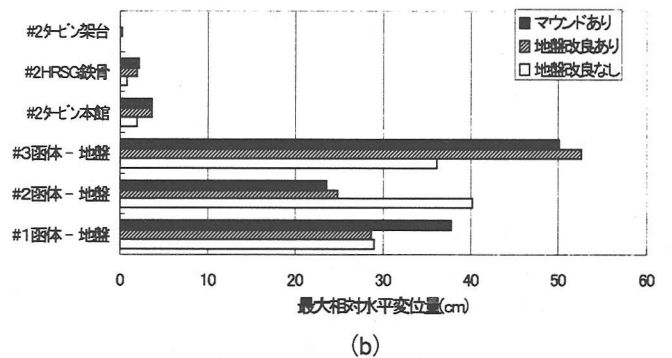
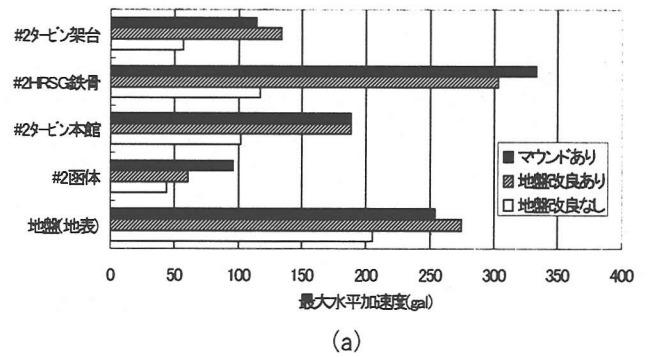


図 3 地盤改良の効果とマウンドの影響

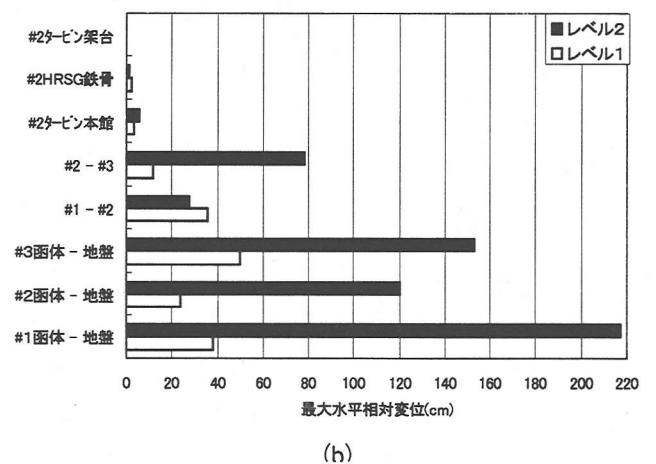
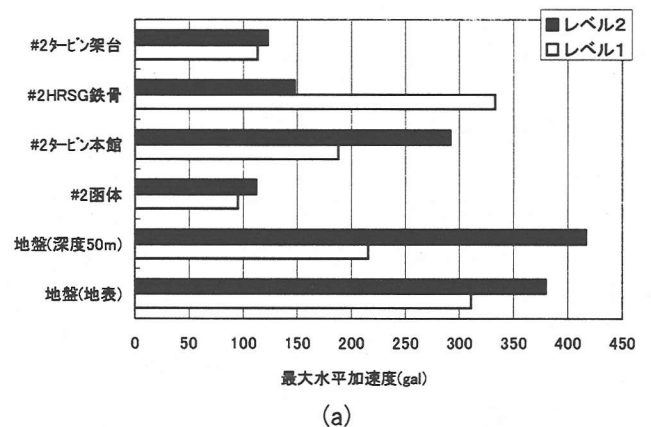


図 4 地震動レベルの影響

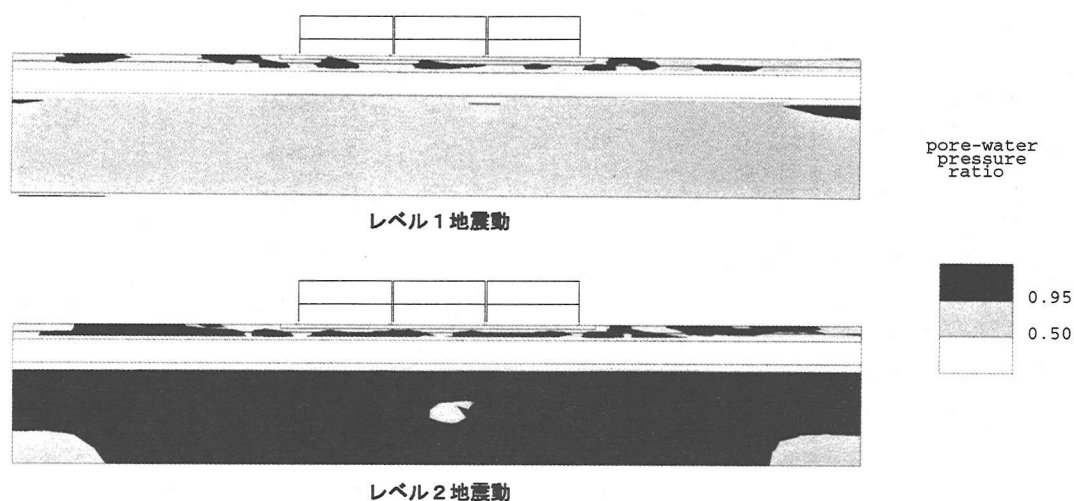


図5 震動終了時点でのモデル過剰間隙水圧分布の比較

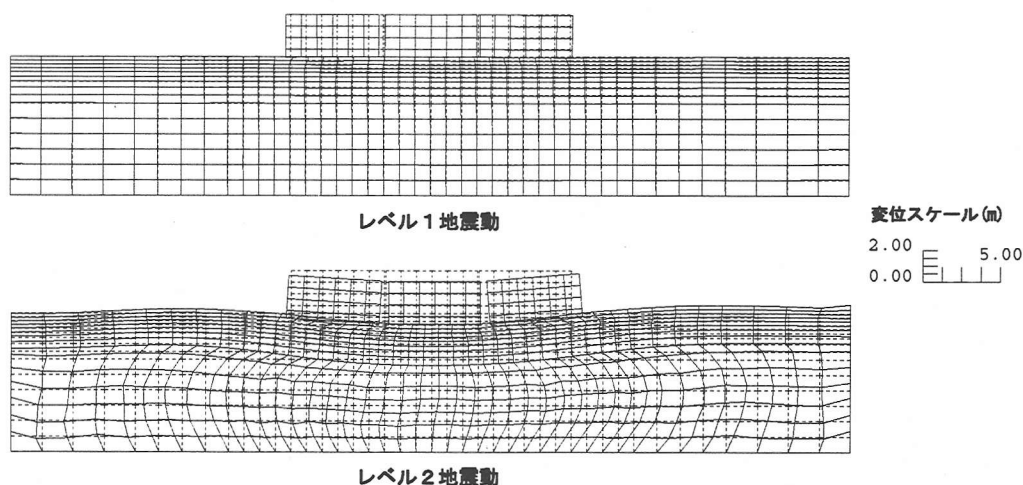


図6 震動終了時点でのモデル全体変位分布の比較

次に、地盤改良の効果を見ると、地盤改良ありでは、地盤改良なしに比べ、過剰間隙水圧の上昇量や鉛直有効応力の低下量が少なく、液状化対策工の効果が確認された。ただし、地盤剛性が高くなり、地盤系及び函体、発電設備の最大水平加速度は大きくなり、函体に対する発電設備の最大水平相対変位も大きくなっており、軟着底構造による免震効果が小さくなることが分かる。

(2) 地震動レベルの影響

表2に示すケース2とケース4を対象に、地震動レベルの違いが軟着底構造に及ぼす影響について検討した。

最大水平加速度の比較を図4(a)に示す。最大水

平加速度は、H R S G鉄骨を除くと、レベル2地震動の方が大きくなっているが、これを個別にみると、地盤系ではレベル2地震動はレベル1地震動の約1.3～1.7倍程度であり、函体系では地震動レベルの違いが現われていないことがわかる。これは、函体系は軟着底構造による免震効果のためと考えられる。最大水平相対変位の比較を図4(b)に示すが、函体と地盤および函体間の相対変位はレベル1よりレベル2の方がかなり大きくなっている。

震動終了時点での過剰間隙水圧分布と変位分布をそれぞれ図5、図6に示す。これらの図により、レベル1地震動の場合、函体側方最上部のN値=11層、N値=20層の一部を除いて全層において液状化がほとんど発生せず、地盤全体の変形量は小さく(数

cm 程度), 液状化による函体直下地盤の不等沈下や函体側方地盤で生じる不平等な隆起もみられない。これに対し, レベル 2 地震動の場合, 粘土層を除いて全層で液状化となっており, そのため, #2 函体を中心とする函体直下地盤では大きな不等沈下が生じ, 一方, 函体側方では地盤の隆起が起っており, #2 函体の最大残留沈下量は 70cm 程度にもなる。

次に, 震動終了直後の各函体に設置されるタービン本館の層間変形角の比較を図 7 に示す。各函体のタービン本館の変形は, レベル 2 地震動の方がレベル 1 地震動に対して 2 倍ほど大きくなっている。ただし, 日本建築センターが設定している設計限界(耐震クライテリア)はレベル 1, レベル 2 地震動に対する許容層間変形角でそれぞれ 1/150 と 1/75 であるが, これに対して今回のレベル 1 とレベル 2 地震動で各函体タービン本館のそれぞれは 1/600 と 1/300 程度であり, 発電設備の機能は保持されているものと考えられる。

(3) 圧密沈下の影響

本検討では, 震動後の過剰間隙水圧消散による地盤と函体の圧密沈下の影響についても調べた。レベル 1 地震動に関しては, 震動中も液状化になっていなかったため, 震動後の沈下量はわずか 0.2cm ほどの増加に留まっていたが, レベル 2 地震動に関しては, 図 8 に示したように地震終了時点から沈下量でさらに約 10~20%増加しており, しかも#2 函体は右側へ 1m ほど大きく移動した。この結果から, 地震後の圧密沈下は震動中の地盤液状化の程度に大きく影響されるものと言える。

4. まとめ

(1) 函体直下にマウンドを設置すれば, 広領域の地盤改良と同じ効果が期待できる。

(2) レベル 1 地震動の場合, 液状化がほとんど発生しないのに対し, レベル 2 地震動の場合, 液状化が発生し, 函体直下地盤は不等沈下し, 側方地盤は不平等な隆起が起る結果となった。また, 函体本体および函体上に設置される建物, 主要機器の応答は入力地震動が増加することによって多少増幅されるが, 函体のソフトランディングによる免震効果により, 発電設備の機能として問題ないと考えられる。

(3) 圧密沈下量は震動後の沈下量からレベル 1 地震動ではほとんど変化しないのに対し, レベル 2 地震動ではさらに約 10cm ほど増加し, #2 函体は右側へ 1m ほど移動している。

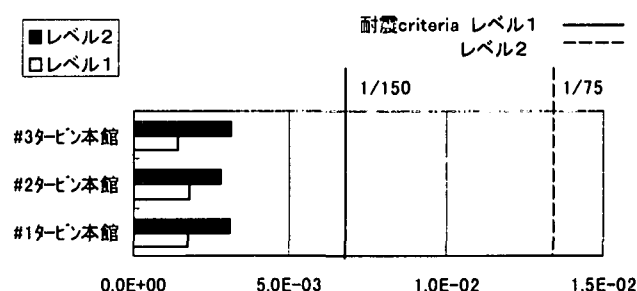


図 7 各函体のタービン本館の層間変形角(rad)

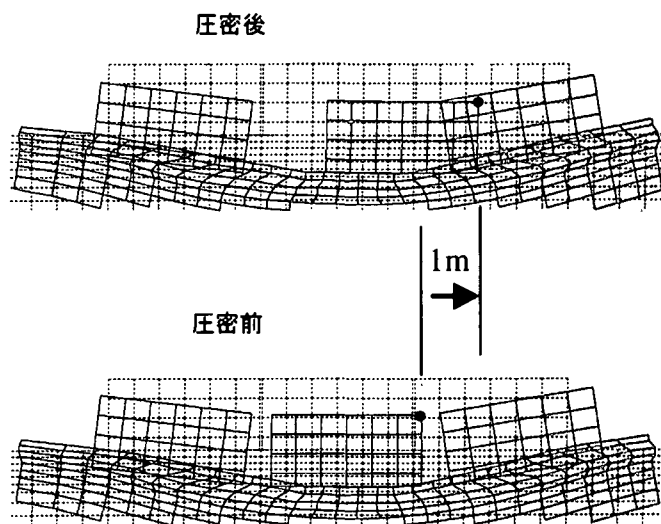


図 8 圧密沈下解析前後の函体及びその周辺地盤の変形の比較 (レベル 2)

参考文献

- 1) 「水面下空間を利用した海上発電所」, 宮本幸始, 土木学会誌, Vol.82, 1996
- 2) 「水面下空間を活用した海上発電所の構想と課題」, 興野俊也 他, 海洋開発論文集, Vol.13, 1997
- 3) 王 均・佐藤正行・吉田望:「昭和大橋サイト矢板護岸被害の有効応力解析」, 地盤工学会「地震時の地盤・土構造物の流動性と永久変形に関するシンポジウム発表論文集」, 平成 10 年 5 月, pp257-262
- 4) 都築富雄・大熊義夫・興野俊野・貝沼憲男・宮本幸始:「軟着底構造による海上発電所の地震時挙動について (Phase1:全応力解析)」, 第 25 回地震工学研究発表会講演集」, 投稿中