

水面下空間を活用した海上発電所の地震時挙動について

Seismic response of offshore thermal power plant utilizes the space under surface of water

興野俊也* 貝沼憲男* 大熊義夫** 王均** 都築富雄** 宮本幸始*
Toshiya Kyono, Norio Kainuma, Yoshio Ohkuma, Jun Wang, Tomio Tsuzuki, Koji Miyamoto

Abstract

The possibility of the conception on an offshore thermal power plant (TEALAND) that does not depend on a conventional reclamation method is evaluated here for the purpose of reducing the cost to supply electric power. The special feature of this conception consists in paying attention to the space under the surface of water.

In this conception, the sea occupation area of the power plant is reduced as much as possible by arranging the generation equipment into the layered inside box. Then it reduces the construction cost by constructing both the component and the generation equipment simultaneously at land and then shortening the construction time.

In this study, seismic responses of the softlanding power plant are analyzed with total and effective stress methods and the equipment specifications are discussed for practical utility.

keywords: total stress analysis, effective stress analysis, liquefaction

1. はじめに

近年、日本経済の国際競争力を左右する電気料金について引き下げが強く求められており、発電所建設に当たっては、設備投資の抑制が大きな課題となっている。

低廉な電力を供給するために、火力発電所は長距離送電による電力損失の回避といった観点から、需要地近傍の臨海部に立地することが望ましい。しかし、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適地を選定することは将来一層困難なものになると予想され、新たに敷地を確保する必要がある。このとき、これまでの沖合埋立立地による方法では、水深の増加や軟弱地盤対策に伴う基礎工事費のコストが増大して「低廉な電力供給」というメリットが失われる。そこで、新たな発電所立地構想として、発電設備をバラスタタンクを有する函体内部に多層化して設置する事で海域占有面積の縮小を図り、また、バラスタ調整をすることで軟弱地盤に対する接地圧を軽減し、建設費の縮減を行う「水面下空間利用型海上火力発電所」を提案した。本論は、発電設備を搭載した発電所函体の地震時応答特性並びに地盤液状化時の応答特性について、全応力並びに有効応力解析を用いて検討した結果を報告するものである。

2. 海上発電所の概要

発電設備は、コンパクトで高出力、高効率で得られる LNG を燃料としたコンバインドサイクル発電所とした。函体構成は、発電設備となるガスタービン、蒸気タービン、ボイラー(HRSG)を搭載するパワートレイン函体、運転管理室や共通設備を搭載するオペレーション函体、ボイラーに用いる純水製造装置や各種貯槽を搭載するユーティリティー函体の3タイプとした。函体規模は、長辺方向約 200m、短辺方向約 60m となる。

発電設備を搭載する函体は、後述する図 3-1 に示すように、高さ 12.5m のバラスタタンクと高さ 15.0m の側壁から構成される RC 構造体で水深レベル 7.5m の水面下に 1 階面フロアが構成される構造とした。

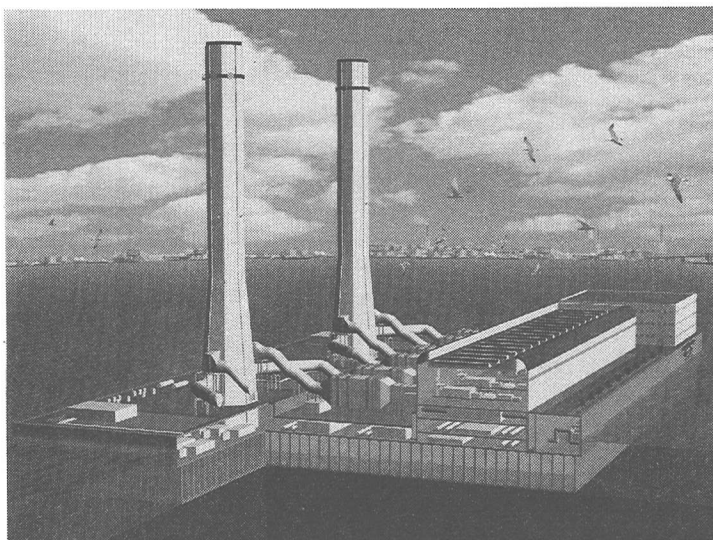


図-1 TEALAND

* 正会員 東京電力株式会社 電力技術研究所土木グループ (〒230-8510 横浜市鶴見区江ヶ崎町 4-1)
**正会員 東電設計株式会社

3. 全応力解析による地震時挙動

(1) 解析条件

函体の接地面におけるすべりと剥離（浮き上がり）を考慮できる地震応答解析手法³⁾を適用して、地盤-函体-発電設備の相互作用を考慮した函体の短辺方向の挙動を検討した。入力地震動には長周期成分が卓越した十勝沖地震（1968年）の八戸港の観測記録を基盤の入射波形に変換して300galに調整した加速度波形を用いた。

函体の断面形状を図3-1に、函体重量と解析用物性値を表3-1示す。函体の設置水深は-20mで、水位はHWL（2.1m）、LWL（0.0m）の2通りとし、軟着底構造の応答特性の特徴を明確にするために、非軟着底構造の解析も行った。接地圧は一様分布を仮定し、水位がHWLの場合は 2.5tf/m^2 、LWLの場合は 4.7tf/m^2 、非軟着底構造の場合は 50.0tf/m^2 とした。函体は3函体をモデル化し、函体間の結合部材はモデル化していない。#1と#3函体の側面に作用する動水圧はWestergaardの近似式で算定した付加質量で考慮した。ただし、非軟着底構造の場合には海上立地を想定しておらず、動水圧は考慮していない。主要な発電設備として、タービン本館、HRSG鉄骨、タービン架台をそれぞれ1質点系でモデル化した。解析では表3-2に示す発電設備の諸元を平面ひずみに変換するために函体長で割ったモデルを用いた。

検討の対象とした地層構成を図3-2に示す。地盤モデルAより地盤モデルBの V_s が大きく、硬い地盤である。地盤Aでは表層の地盤改良を考慮し、地盤Bでは地盤改良をしない条件とした。地盤Aの解析モデルを図3-3に示す。境界条件は底面と側方ともに粘性境界とした。底面粘性境界に入力地震動を入射波として入力した。2次元の要素分割に合わせた等価線形による1次元波動論の収束 V_s を2次元モデルの地盤部分に水平に割り付けて、2次元解析ではジョイント要素以外は線形解析とした。地盤Aの地盤改良については、初期 V_s を用いることで表現した。1次元波動論の地表の1次と2次のピーク周波数において、1次元波動論の収束減衰と2次元解析で用いるRayleigh減衰が一致するように設定した。

ジョイント要素については、 $\sigma_n \cdot \tan\phi$ 以上のせん断応力が作用するとすべり始め、 σ_n が引張状態となると剥離が生じるとした。ただし、 σ_n は地震時の接地圧（ $\sigma_n = \sigma_{ns} + \sigma_{nd}$ 、常時接地圧+地震時の接地圧の変動分）で、 $\tan\phi$ は函体と地盤の摩擦係数で0.6とした。

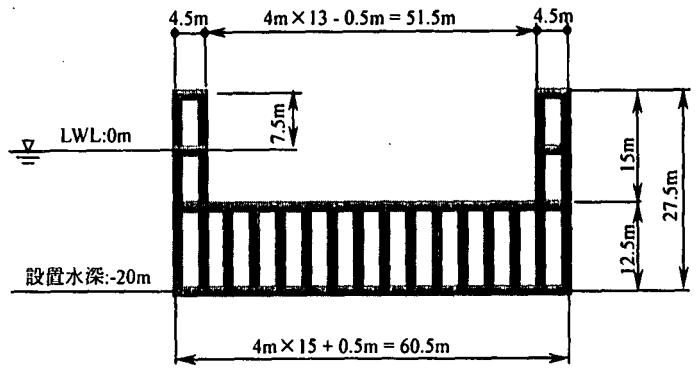


図3-1 函体の断面形状

表3-1 函体の諸元

		1 函体の重量 (tf)	等価単位体積重量 (tf/m ³)	等価せん断波速度 (m/s)
側壁部	コンクリート	35,000	0.28	1,430
	他の発電設備	25,000		
	主要発電設備	15,000		
	小計	75,000	1 質点系でモデル化	
タンク部	コンクリート	135,000	1.61	1,270
	タンク内の土砂	79,500		
	タンク内の海水	78,500		
	小計	293,000		
合計		368,000		

表3-2 主要な発電設備の諸元（1 函体当たり）

	重量 (tf)	せん断パネ定数 (tf/m)	固有振動数 (Hz)
タービン本館	5,100	27,000	1.2
HRSG鉄骨	4,000	64,000	2.0
タービン架台	5,900	443,000	4.4

(1)地盤モデルA

層厚 (m)	単位体積重量 (tf/m ³)	V_s (m/s)	ポアソン比	N 値	土質
10	1.50	125	0.45	2	粘性土
10	1.50	160	0.45	4	粘性土
10	1.75	275	0.30	21	線形
∞	1.75	300	0.30	50	線形

(2)地盤モデルB

層厚 (m)	単位体積重量 (tf/m ³)	V_s (m/s)	ポアソン比	N 値	土質
5	2.00	250	0.45	11	砂質土
5	1.85	300	0.45	20	砂質土
15	1.90	375	0.45	50	粘性土
∞	1.90	435	0.45	50	線形

図3-2 検討対象とした地盤の地層構成

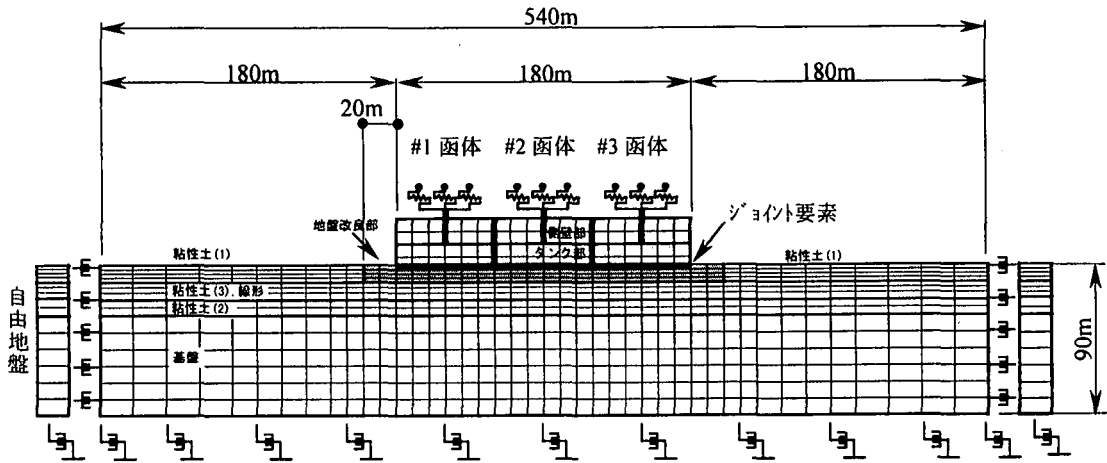


図 3-3 解析モデル (地盤モデル A)

(2) 解析結果

地盤に対する函体中央の水平方向 (すべり) の変位波形を図 3-4 に、地盤に対する#2 函体の鉛直方向 (剥離) の変位波形を図 3-5 に示す。すべり量は#2 函体よりも#1 と#3 函体の方が大きくなっているが、波形はよく似ており地震終了時にはマウス側に残留変形が生じている。また、函体の右端と左端が交互に剥離し、剥離量は右端の方が大きくなっている。函体頂部間の水平方向の相対変位波形を図 3-6 に、自由地盤の地表に対する相対変位で表示した残留変形を図 3-7 に示す。#2 函体よりも#1 と#3 函体の水平方向の残留変形が大きく、#1 と#2 が接近し、#2 と#3 が離れて行くことがわかる。また、鉛直方向にはほとんど残留変形が生じていない。函体のすべり量、剥離量、函体間の相対変位の最大値の比較を表 3-3 に示す。地盤 B よりも地盤 A の方が変位量は大きく、すべり量は最大でも 20cm 以下、函体間の相対変位は 7cm 以下である。

#2 函体の函体側と地盤側および発電設備の水平方向の最大応答値と接地圧との関係を図 3-8 に示す。接地圧の低下に伴い、函体変位は増加し、函体加速度は減少し、地盤加速度は増加する傾向が見られる。図 3-9 は#2 函体の軟着底構造による免震効果を非軟着底構造に対する比率で表示したもので、発電設備の変位は函体に対する相対変位で評価した。地盤 A の HRSG 鉄骨を除けば、接地圧が低下するほど免震効果は大きく、HWL の函体の加速度は 1/2 以下になっている。

地盤 A の#2 函体の函体側と地盤側の加速度波形のフーリエスペクトルを入力地震動のフーリエスペクトルで割ったスペクトル比を図 3-10 に示す。函体側は 0.8Hz 付近の倍率が最大となっており、軟着底構造による免震効果は 3Hz 以下で生じ、3Hz 以上では軟着底構造の方が増幅して

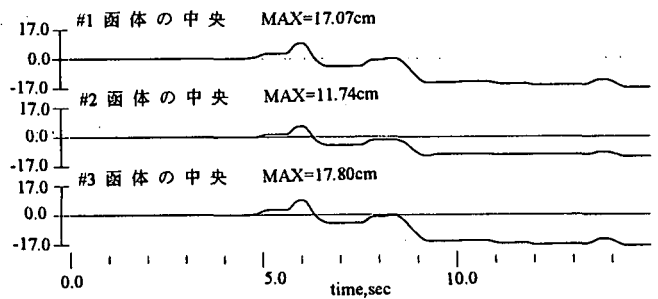


図 3-4 函体中央の水平変位 (地盤 A, HWL)

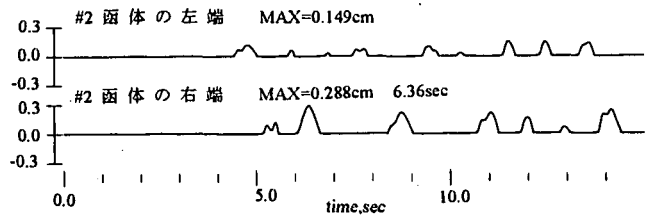


図 3-5 #2 函体の鉛直変位 (地盤 A, HWL)

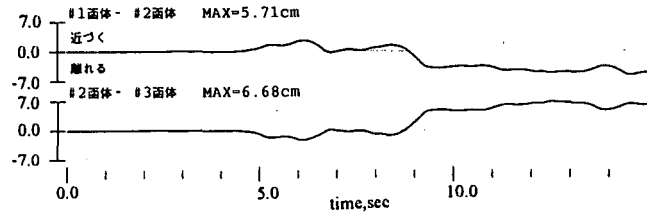


図 3-6 函体頂部間の水平相対変位波形 (地盤 A, HWL)

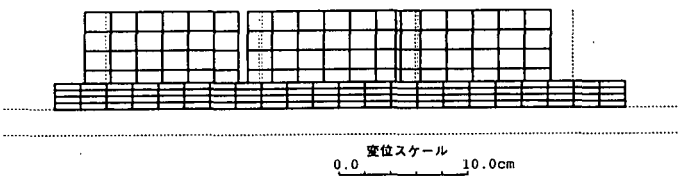


図 3-7 残留変形図 (地盤 A, HWL)

表 3-3 函体の最大変位の比較 (HWL)

	地盤 A	地盤 B
函体のすべり量	18.5cm(#3 右端)	6.5cm(#1 左端)
函体の剥離量	0.29cm(#2 右端)	0.05cm(#2 右端)
函体間の相対変位	6.7cm(#2-#3)	5.1cm(#1-#2)

いる。地盤側も 2Hz 以下では軟着底構造による免震効果が見られるが、2Hz 以上の倍率が函体側に比べ非常に大きくなっている。発電設備に関する同様なスペクトル比を図 3-11 に示す。発電設備は機器の固有振動数で大きな増幅を示し、HRSG 鉄骨とタービン架台には 0.8Hz にもピークが見られる。タービン架台では固有振動数の 4Hz 付近では軟着底構造の方が倍率は大きく、高振動数の発電設備については、地盤条件と入力地震動の周波数特性によっては、軟着底構造の方が増幅する可能性がある。

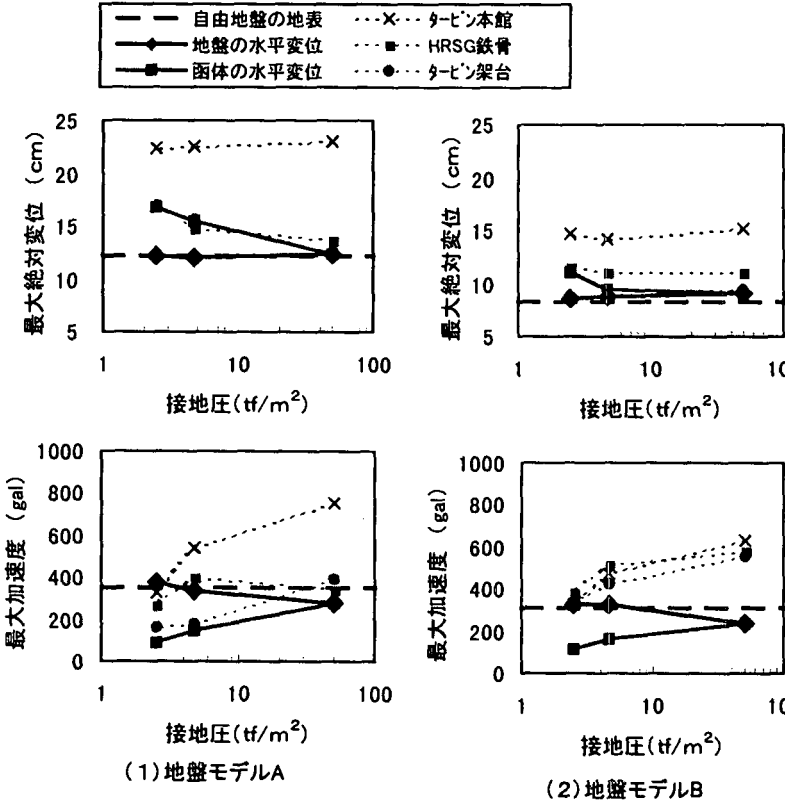


図 3-8 #2 函体の最大応答値

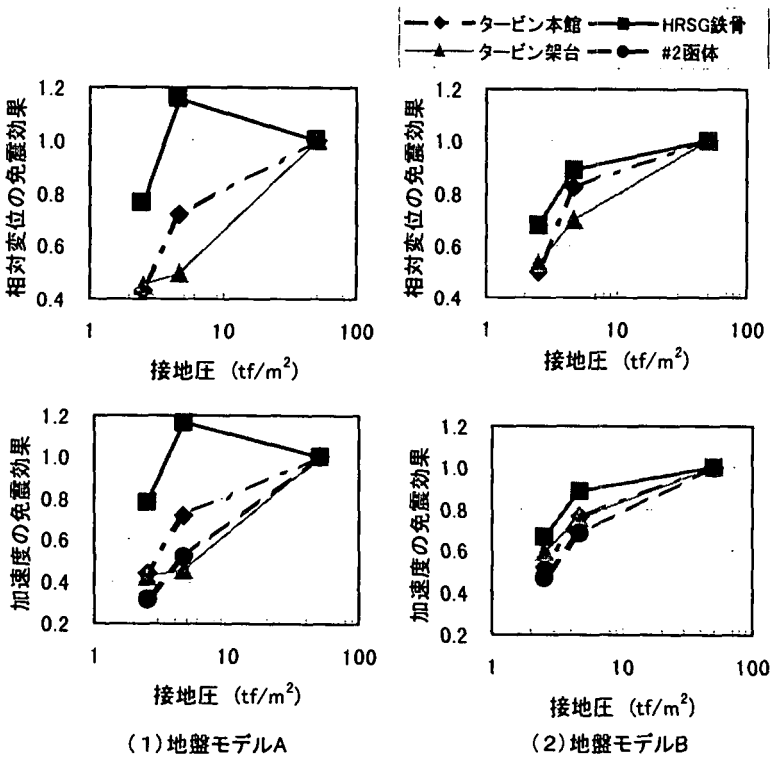


図 3-9 軟着底構造による免震効果

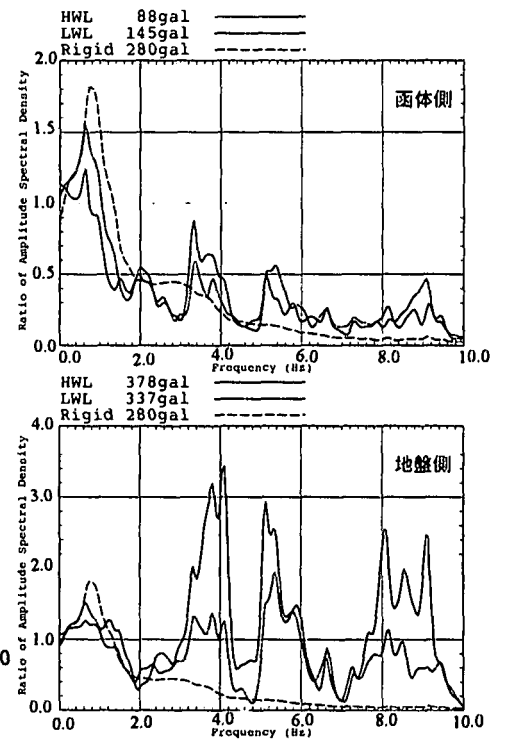


図 3-10 #2 函体のスペクトル比 (地盤 A)

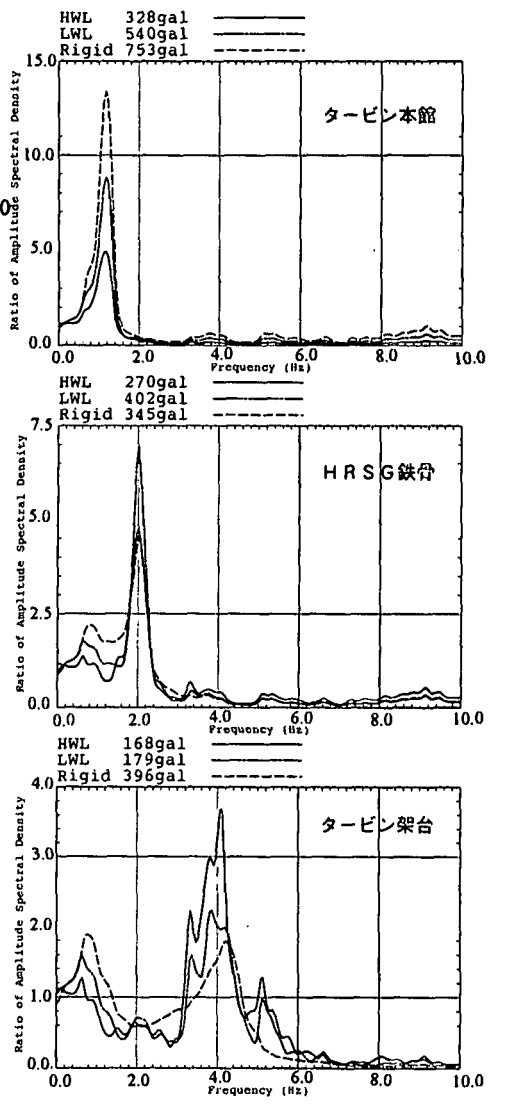


図 3-11 #2 函体の発電設備のスペクトル比 (地盤 A)

4. 有効応力解析による地震時挙動

(1) 解析条件と解析ケース

二次元有効応力解析⁴⁾の解析モデルや入力地震動などの解析条件は、前述した全応力解析と同じである。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。地盤材料は全応力解析の線形に対し、有効応力解析は非線形とした。

解析は、函体の設置水深-20mとし、地盤Bの地盤改良の有無の2ケースを実施した。なお、地盤改良については、最上部層のN値=11と20をN値=35程度に改良したものと設定した。各砂層の液状化強度曲線を図4-1に示す。

(2) 解析結果

全応力解析では考慮されない設置地盤の液状化による海上発電所への影響について、二次元有効応力解析手法を用いて検討を行った。

#2 函体直下の中央断面 (LineC) の過剰間隙水圧、地表と#2 函体中央の水平加速度および#2 函体のすべり量の時刻歴を図4-2に示す。地盤の過剰間隙水圧は、2ケースとも震動が始まってから6秒程度まで徐々に上昇、蓄積していき、その後、地盤改良をしても過剰間隙水圧比はほぼ $u/\sigma'_v \approx 1.0$ (深度 1.25m における上載圧 $= 0.39 \text{ kgf/cm}^2$) となる。 $u/\sigma'_v \approx 1.0$ となる時刻は地盤改良をした方が遅い。この影響を受けて、地表の最大加速度は改良ありでは 375gal で、入力加速度の 300gal より増幅しているが、改良なしでは 206gal で、入力加速度より小さくなっている。また、#2 函体の加速度は改良ありでは 60gal で、改良なしでは 44gal であり、全応力解析と同様に免震効果が見られる。#2 函体のすべり量は、2ケースとも 3.5秒あたりからすべりが始まっており、最大すべり量は、地盤改良したものはしないものの6割程度で、地盤改良なしの場合、最大で 40cm 程度である。

#2 函体の函体及び発電設備の水平最大加速度の比較を図4-3に、水平最大変位の比較を図4-4に示す。図中には、全応力解析の地盤改良なしの結果を併せて示し、変位は絶対変位で表示した。最大加速度は、全応力解析より有効応力解析の方が小さくなっており、有効応力解析では地盤の軟らかい地盤改良なしがより小さくなっている。最大水平変位は、全応力解析より変位量が大きくなっている。

震動終了時点での函体の近傍地盤における過剰間隙水圧比分布を図4-5に示す。地盤改良部に着目すると、改良なしでは、部分的に液状化(過剰間隙水圧比が 95%に達する)しているのに対して改良ありのケースでは、全く液状化していない。従って、液状化対策工の効果が確認でき、今回の地盤モデルが比較的硬いため、地盤改良の有無にかかわらず地盤全域では液状化しないことが分かる。

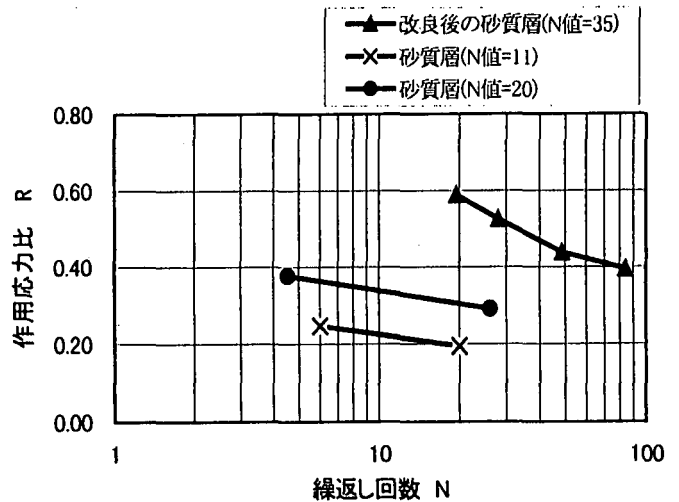


図 4-1 各砂層の液状化強度曲線

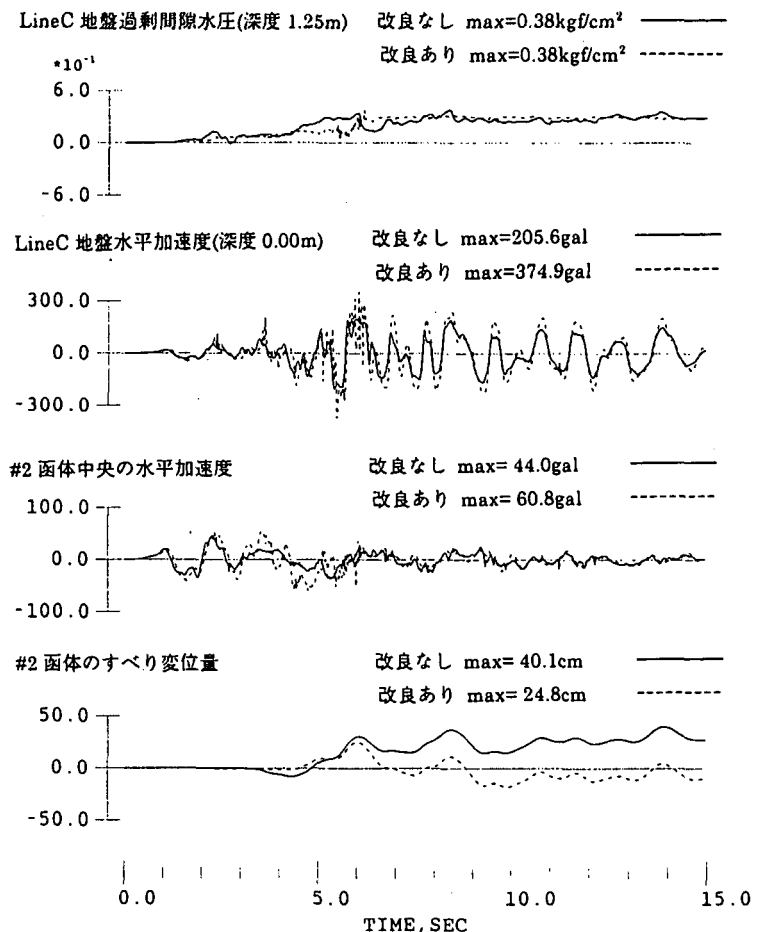


図 4-2 過剰間隙水圧、水平加速度及びすべり量の時刻歴

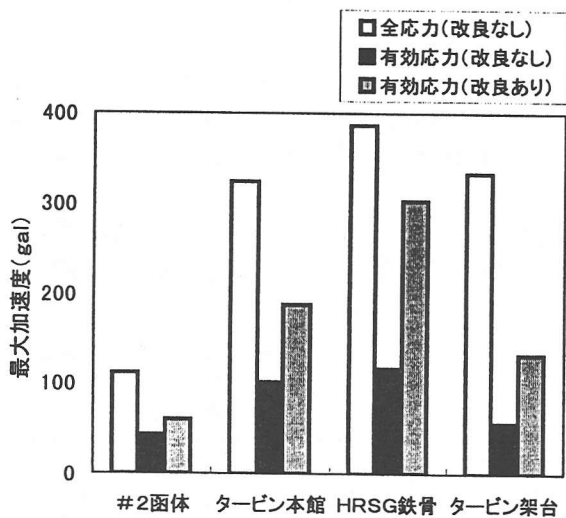


図 4-3 最大水平加速度の比較

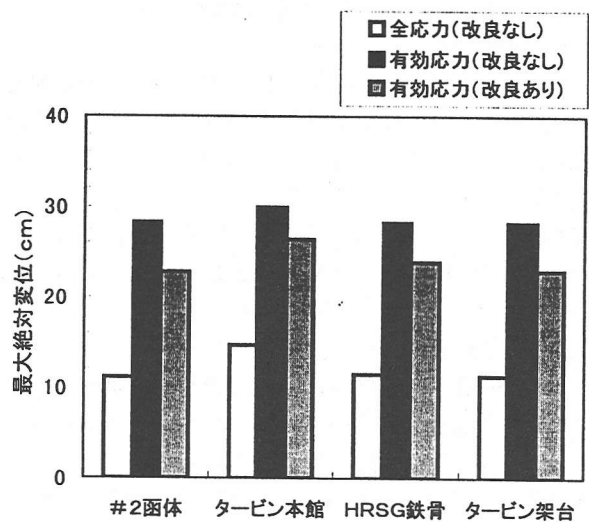


図 4-4 最大水平変位の比較

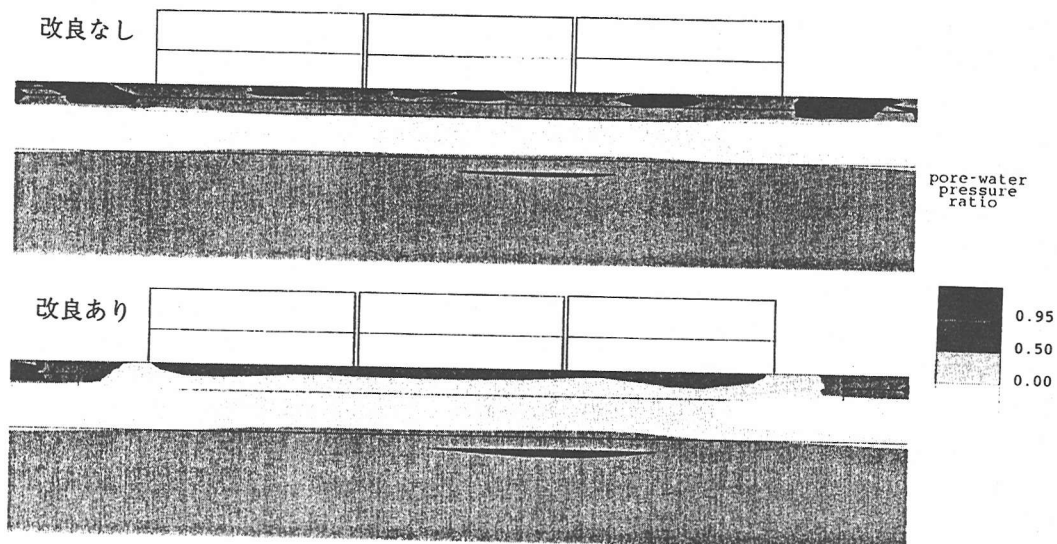


図 4-5 過剰間隙水圧比分布

5. まとめ

接地圧を軽減した「水面下空間利用型海上火力発電所」の地震時応答特性について、全応力解析並びに有効応力解析を用いた検討を行った。全応力解析結果からは、軟着底構造による免震効果は接地圧の低い H.W.L 時に加速度が概ね 1/2 以下になっている。周波数的には 3 Hz 以下で顕著に低減しており、比較的長周期が卓越した地震動の卓越周波数領域に対応していることが確認された。しかし、高振動の固有周期の発電設備については、地盤条件と入力地震動の周波数特性によっては、増幅する場合のあることが分かった。液状化の影響を考慮できる有効応力解析は、用いる構成則によって解が異なるが、今回の解析では 40cm 程度のすべりが生じる結果となり、海底地盤の地震時挙動についての評価が重要であることが分かった。今後は、海底地盤-函体-発電設備の地震時挙動解析の精度向上を図り、適切な変位吸収対策や沈下対応策について検討を行う予定である。

(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) 「水面下空間を利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) 「地盤-構造物系の非線形地震応答解析」, 土岐憲三, 三浦房紀, 土木学会論文報告集, 第 317 号, 1982
- 4) 小瀬木克己, 王 均, 黒瀬浩公, 佐藤正行, 石川博之, 藤谷昌弘: 砂の非排水繰返しせん断試験のシミュレーション, 土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集/Ⅲ-A, pp.332-333, 1996.