

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)

都築富雄¹・興野俊也²・大熊義夫¹

¹ 東電設計株式会社 (〒110-0015 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)

ジョイント要素により函体と地盤の間の滑りと剥離をモデル化した全応力による地震応答解析手法を用いて、軟着底構造による海上発電所の地震時挙動を地盤-函体-発電設備の相互作用を考慮して、地震動レベル、接地圧、加震方向をパラメータに検討した。

接地圧の低下(水位の上昇)に伴って、函体と発電設備の加速度応答が低減する軟着底構造による免震効果が確認できた。短辺方向と長辺方向の応答特性には大きな違いが見られず、函体の滑り量は最大でレベル1地震動(300gal)では5cm、レベル2地震動(620gal)では40cm程度となっている。

Key Words : total stress analysis, soft landing structure, sliding, separation

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。本論は発電設備を搭載した函体の地震時応答特性について、全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

海上発電所の函体構成は、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タイプを想定している。

パワートレイン函体は、図2-1に示すようにバラストタンクと側壁から構成されるRC構造体で水深

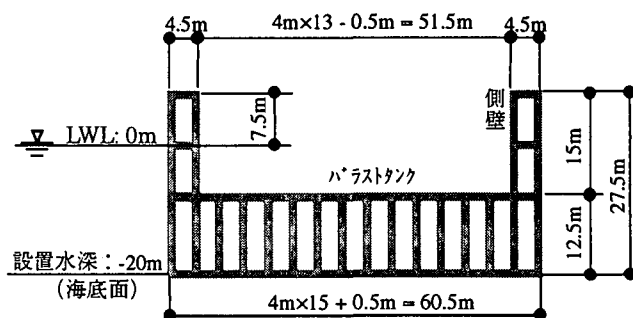


図 2-1 函体の断面形状（短辺方向）

レベル-7.5mの水面下に1階面フロアーが構成される構造である。函体規模は、長辺方向約200m、短辺方向約60mとなる。

3. 解析モデル

パワートレイン函体が3つ並んだ状態を解析の対象とした。函体の接地面における滑りと剥離をジョイント要素によってモデル化した全応力による地震応答解析手法⁴⁾を適用して、地盤-函体-発電設備の相互作用を考慮した地震時挙動を検討した。

函体の設置水深は-20mで、水位はHWL (2.1m)

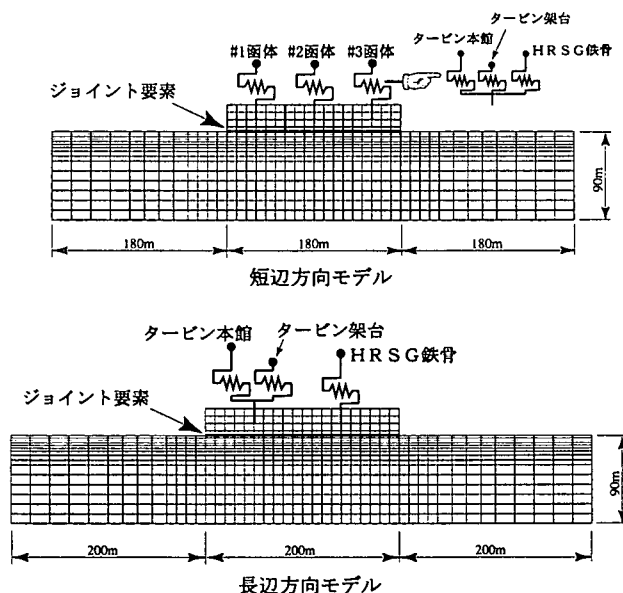


図 3-1 解析モデル

表 3-1 函体の諸元

		1 函体 当たりの 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	コンクリート部	35,000	0.28	1,430
	他の発電設備	25,000		
	主要発電設備	15,000		
			1 質点系でモデル化	
タ ン ク	コンクリート部	135,000	1.61	1,270
	タンク内の土砂	79,500		
	タンク内の海水	78,500		

表 3-2 主要な発電設備の諸元 (1 函体当たり)

発電設備	重量 (tf)	1 次固有振動数 (Hz)	
		短辺方向	長辺方向
タービン本館	5,100	1.15	1.22
HRSG 鉄骨	4,000	2.00	2.50
タービン架台	5,900	4.35	4.35

と 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 (浮力による接地圧の低減を考慮しないモデル, Rigid) の解析も行った。接地圧は HWL で 2.5tf/m², LWL で 4.7tf/m², Rigid で 25tf/m² である。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モデル化した。ただし、Rigid 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。

解析モデルを図 3-1 に示す。函体はソリッド要素に置換し、境界条件は底面と側方ともに粘性境界とした。短辺方向の解析では、3 函体をモデル化し、函体間の結合部材はモデル化せずに、#1 と #3 函体の側面にだけ動水圧を作用させた。函体重量と解析用物性値を表 3-1 に、モデル化した主要な発電設備の諸元を表 3-2 に示す。それぞれの設備の 1 次固有振動数と等価となるように 1 質点系でモデル化し

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 (1)
5	1.85	300	0.45	砂質土 (2)
15	1.90	375	0.45	粘性土
基盤	1.90	435	0.45	線形

図 3-2 地層構成

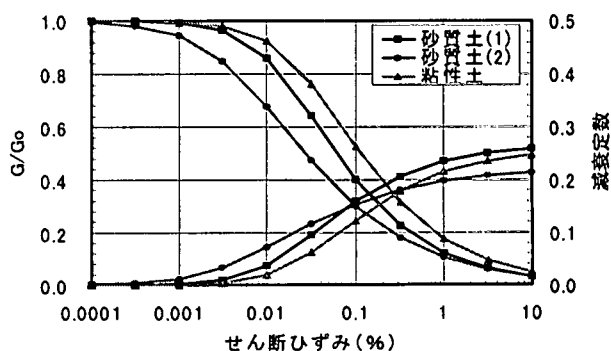


図 3-3 $G/G_0 \sim \gamma$, $h \sim \gamma$ 曲線

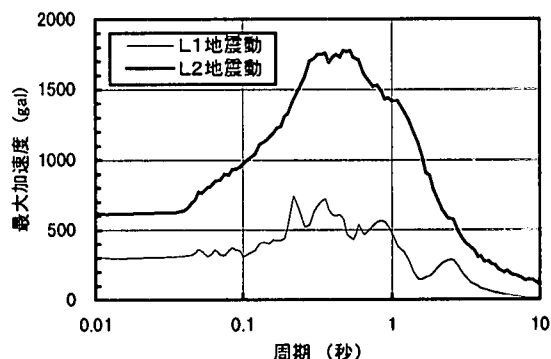


図 3-4 入力地震動の加速度応答スペクトル ($h=5\%$)

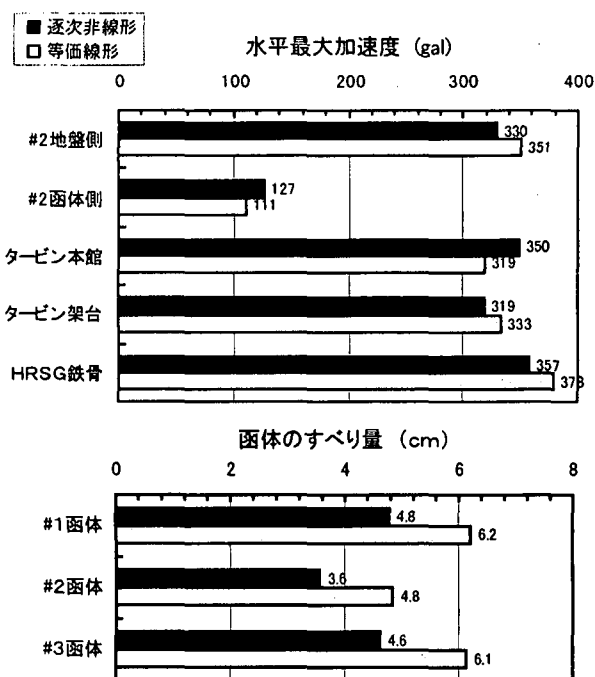
た。地層構成を図 3-2 に、Ramberg-Osgood モデルによる $G/G_0 \sim \gamma$, $h \sim \gamma$ 曲線を図 3-3 に示す。

ジョイント要素については、作用するせん断力が摩擦抵抗 ($\sigma_n \cdot \tan \phi$) を越すと滑り始め、 σ_n が引張状態となると剥離が生じる条件を与えている。ただし、 σ_n は地震時の接地圧で、 $\tan \phi$ は函体と地盤の摩擦係数で 0.6 とした。

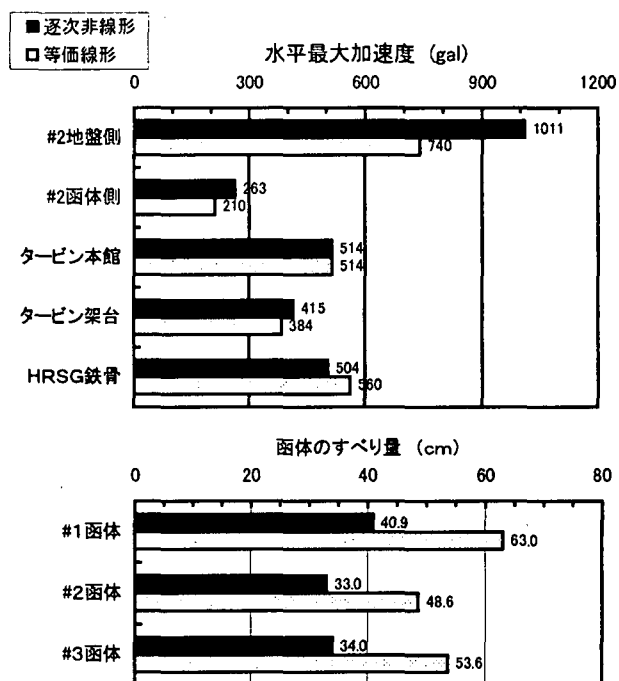
レベル 1 地震動として最大加速度を 300gal に調整した八戸波 (十勝沖地震, 1968 年) を、レベル 2 地震動として 620gal に調整した人工地震波を用いた。加速度応答スペクトルは図 3-4 に示すように、10 秒以下の周期帯ではレベル 2 地震動の方が大きくなっている。

4. 地震動レベルに対する解析手法の選択

短辺方向の HWL の水位において、等価線形解析 (等価線形による 1 次元波動論の収束 V_s を 2 次



(1) レベル1地震動



(2) レベル2地震動

図 4-1 解析手法の影響 (等価線形解析と逐次非線形解析, HWL)

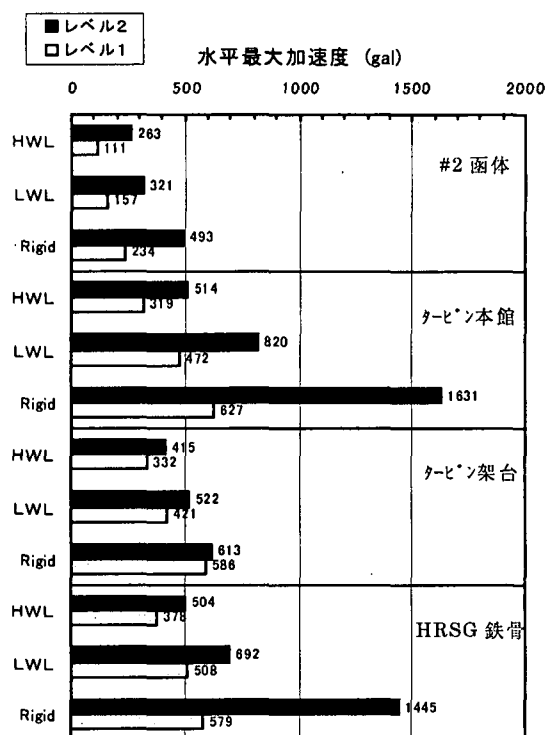


図 5-1 最大加速度の比較

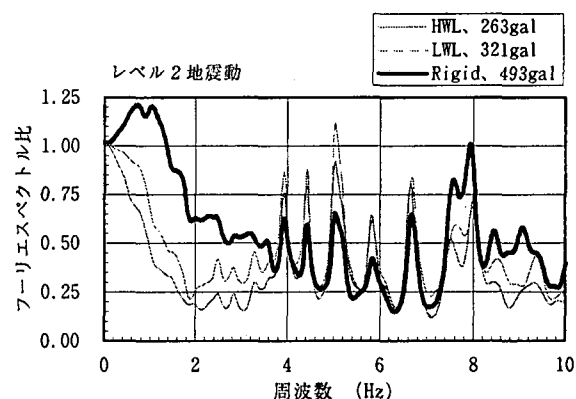


図 5-2 #2 函体の加速度フーリエスペクトル比

の滑り量に差が見られることから、逐次非線形解析を適用した。

5. 地震動レベルの影響

地震動レベルの違いによる影響を検討した。短辺方向の各水位における#2 函体と発電設備の最大加速度の比較を図 5-1 に示す。地震動レベルに関わりなく水位の高い方が函体と発電設備の加速度は小さくなっており、軟着底構造による免震効果が見られる。タービン本館と HRSG 鉄骨は水位が高くなるほど地震動レベルの影響が小さくなる傾向が見られるが、タービン架台では地震動レベルの影響をあまり受けていない。レベル2の入力地震動に対する#2 函体の加速度波形のフーリエスペクトル比を図 5-2 に示す。軟着底構造による免震効果は 4Hz 以下の周波数帯で明瞭である。図 5-3 に示すように、函体近傍地盤のせん断ひずみも小さく、地盤においても

元モデルの地盤部分に水平に割り付けた線形解析)と逐次非線形解析 (Ramberg-Osgood モデル, Masing 則) をレベル1とレベル2の地震動で比較し、地震動レベルと解析手法の関係を検討した。

図 4-1 に示すように滑り量は等価線形解析の方が大きくなる傾向が見られる。レベル1地震動には、水平加速度と函体の滑り量に手法による差が小さいことから等価線形解析を適用し、レベル2地震動には、加速度では解析手法による差は小さいが、函体

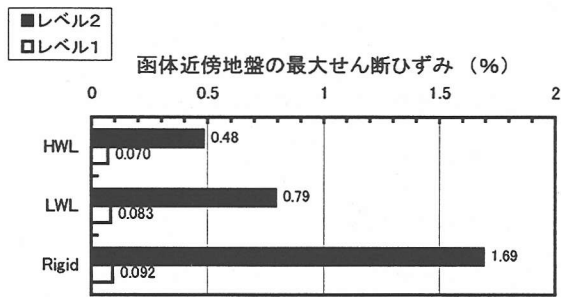


図 5-3 最大せん断ひずみの比較

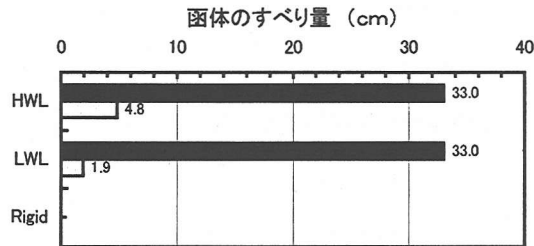


図 5-4 函体の滑り量の比較



図 5-5 函体どうしの相対変位の比較

軟着底構造の影響が見られる。

函体の滑り量は図 5-4 に示すようにレベル 1 地震動では水位が高くなるほど大きくなっているが、レベル 2 地震動では HWL と LWL に明らかな差は見られない。HWL では、レベル 1 地震動で 5cm、レベル 2 地震動で 33cm となっている。

函体頂部の函体どうしの相対変位は図 5-5 に示すように水位が高くなるほど大きくなっている。HWL では、レベル 1 地震動で 4cm、レベル 2 地震動で 11cm となっている。

6. 加震方向の影響

レベル 2 地震動における短辺方向と長辺方向の応答を比較した。図 6-1 に示すように、固有振動数が方向によって異なる HRSG 鉄骨（短辺：2.0 Hz、長辺：2.5Hz）の短辺方向と長辺方向の Rigid において加速度に違いが見られるが、他の設備には明瞭な差は見られず、加震方向の影響は小さいことがわかる。図 6-2 に示すように函体の滑り量も最大で 40cm 程度で大きな違いは見られない。

7. まとめ

・軟着底構造による免震効果が構造物と地盤の両

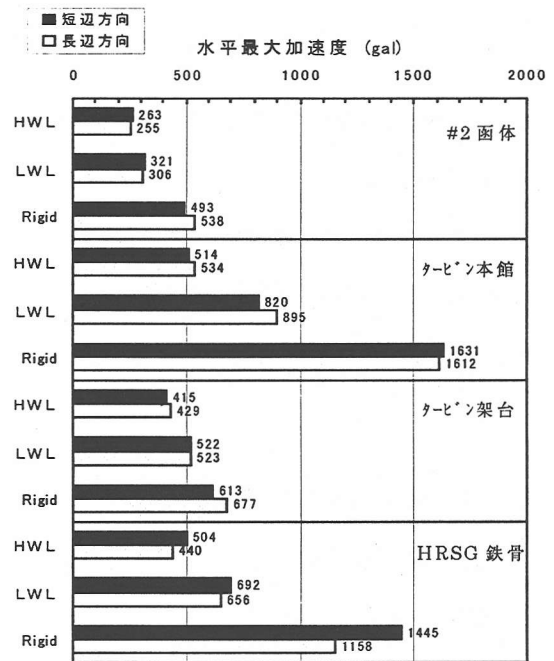


図 6-1 最大加速度の比較

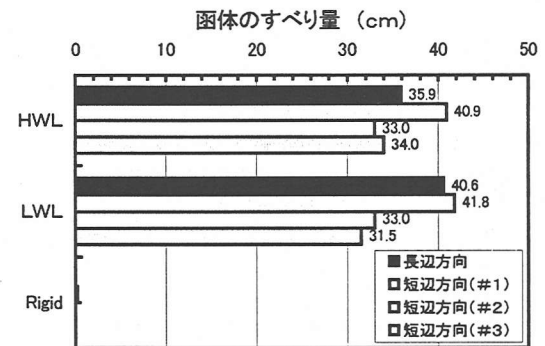


図 6-2 函体の滑り量の比較

者で確認できた。

- ・レベル 2 地震動の等価線形解析による評価は函体の滑り量が過大となる可能性がある。
- ・函体の滑り量はレベル 1 地震動で 5cm、レベル 2 地震動で 30cm 程度となっている。
- ・函体どうしの相対変位はレベル 1 地震動で 4cm、レベル 2 地震動で 11cm となっている。

今後は、全応力解析の精度向上を図り、海底地盤の液状化についても検討していく予定である。

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) 「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」, 興野俊也 他, 海洋開発論文集, Vol.14, 1998
- 4) 「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