大型火力発電所で観測された鳥取県西部地震および芸予地震の記録とそのシミュレーション解析

SIMULATION ANALYSIS OF EARTHQUAKE RECORDS OBSERVED AT A LARGE-SCALE THERMAL POWER STATION IN THE TOTTORIKEN-SEIBU AND GEIYO EARTHQUAKES

宮川信幸 — *1 宮村正光 — *2
武井邦生 — *3 杉本 — *4

Nobuyuki MIYAGAWA — *1 Masamitsu MIYAMURA — *2
Kunio TAKEI — *3 Hajime SUGIMOTO — *4

キーワード:

火力発電所, 鳥取県西部地震, 芸予地震, 観測記録, シミュレーション解析, 非線形特性, サイスミックタイ

Keywords:

Thermal power station, Tottoriken-Seibu and Geiyo earthquake, Observed records, Simulation analysis, Nonlinear property, Seismic tie

Earthquake observation system installed at the Takehara Thermal Power Station has been operated since 1983 and many earthquake records have been observed and accumulated. During this period, two large earthquake records were observed in the Tottoriken-Seibu and Geiyo earthquakes. In this paper, the simulation analysis was performed focusing on the nonlinear property of seismic tie connecting building and boiler based on the information obtained by observed data. The vibration model and evaluated major input parameters can well simulate the general feature of response properties of building and boiler both in two earthquakes and verify the vibration model used for the design of this building.

1. はじめに

広島県竹原市に建設された竹原火力発電所3号機ボイラ建屋では、1983年の竣工以来現在にいたるまで20年余りにわたり地震観測が継続されている。この間、多くの中小地震の記録が観測、蓄積されてきたが、2000年10月の鳥取県西部地震と翌年3月の芸予地震と相次いで、観測期間中の最大規模の地震が観測された。現在までこのような大型の火力発電所ボイラー建屋で観測された大きな地震記録は少なく、建物設計時に用いた解析モデルの妥当性を検証する上で、貴重なデータが得られた。

本建屋の構造上の特徴として、事務所ビルなど一般の建築物とは異なり、大型の柱、梁、鉄骨ブレースにより立体架構が構成され、建物内部には全重量44000tの約4分の1に相当する重さのボイラーが頂部より吊り下げられる構造形式であること、ボイラーと建屋の間はサイスミックタイと呼ばれる鋼製ダンパーで連結され、この特性が建屋全体の振動挙動に大きな影響を与えていることがあげられる。

本報告ではこれらの記録を分析し、2つの地震における建屋、ボイラーの特徴的な振動挙動を把握すると共に、設計時の解析モデルを用いて、サイスミックタイの非線形特性を考慮して、建屋全体の応答性状とボイラーと建屋間の振動挙動に着目したシミュレーション解析を行った。

2. 地震の概要

観測された地震の概要は表1のとおりで、20年間の観測期間中最大級の地震動強さである。鳥取県西部地震はM7.3、震源距離120kmの比較的遠距離の地震であるのに対し、芸予地震はM6.4、震源距離45kmの近距離地震である。震源位置と建物位置を図1に示す。

表1 地震の概要

地震名称	地震発生日時	震源	マグニチュードM	震央距離(km)	震源深さ(km)	震度
鳥取県西部地震	2000.10.06 13時30分	N35.3° E133.4°	7.3	115	15	4
芸予地震	2001.03.24 15時28分	N34.1° E132.7°	6.4	35	51	5

図1 震源位置と建物位置

写真1 建物外観

*1 ㈱小堀鐸二研究所構造部 部長
(〒107-8502 東京都港区赤坂6-5-30)

*2 ㈱小堀鐸二研究所研究部 部長・工博

*3 電源開発㈱エンジニアリング事業部建築施設事業グループ 課長代理

*4 ㈱開発設計コンサルタント建築事業部 建築設計部長

*1 Manager, Kobori Research Complex Inc., Structural Department

*2 Manager, Kobori Research Complex Inc., Research Department, Dr. Eng.
*3 Assistant Manager, Electric Power Development Co., Ltd, Architecture Group, Engineering Department

*4 Manager, Development Design Consulting Co., Ltd., Architectural Department

3. 建物と地震記録の概要

3. 1 建物概要、地震計の設置位置とサイスミックタイの形状

観測対象の竹原火力発電所3号機ボイラ建屋は広島県竹原市にある出力70万KWの石炭火力発電所である。建屋の平面形状は87m×63mの矩形で、高さは77.1mである。隣接するタービン建屋とは構造上分離している。建屋の主要構造は鉄骨造でブレース構造であり、内部には約12000tのボイラ函体が頂部大梁から吊り下げられている。ボイラと建屋はサイスミックタイ(鋼製)により数十点で連結され、これにより地震時の振動が抑えられている。基礎版は径1.5mのベント杭により風化花崗岩層に支持されている。建屋の平面図および断面図を図2、図3に示す。

図2 平面図

図3 建物NS方向断面図と地震計設置位置

地震観測には3成分のサーボ型加速度計を用いており、その設置位置は建屋側5点(1階東側(FL+0.0m)、6階東側(FL+31.6m)、8階東側(FL+47.6m)、8階西側(FL+47.6m)、11階東側(FL+73.3m))、ボイラ側2点(6階東側(FL+31.6m)、8階東側(FL+47.6m))の計7点21チャンネルである。図3中に地震計設置位置を示す。

サイスミックタイには図4に示す2つのタイプがあり、4階～11階までの各階に設置されている。NS方向はリンク式が10か所、挟込み式が14か所の合計24か所であり、EW方向はリンク式が18か所である。サイスミックタイは熱膨張による変形を吸収するために建屋とボイラとの間に数mmのギャップ(隙間間隔)を保つ機構であり、その設計値はリンク式では9mm、挟込み式では2.3～4mmである。

図4 サイスミックタイの形状

写真2 サイスミックタイの外観

3. 2 観測記録の分析

(1) 加速度最大値分布と加速度波形

観測された各点の加速度最大値を表2に、加速度波形(NS方向)を図6に示す。2つの地震における建屋の水平方向最大加速度は1階床で35～50cm/s²、頂部で80～170cm/s²程度である。1階床に対する建屋頂部の応答倍率は図5に示すように水平、上下共2倍～3.5倍である。いずれの地震においても地震後の調査では建屋の主要構造部、ボイラおよびサイスミックタイ周辺に損傷は見られなかった。6階と8階には建屋、ボイラの両方に地震計が設置しており、両者の挙動の比較が可能である。2地震の振動性状を見ると、8階位置では建屋、ボイラはほぼ同じ動きをしているのに対し、6階ではボイラ側に建屋との接触によると見られる大きな加速度が生じている。

表2 加速度最大値 (cm/s²)

地震	階	高さ (m)	NS		EW		UD	
			建屋	ボイラ	建屋	ボイラ	建屋	ボイラ
鳥取県西部	11F	73.3	86.3	/	109.9	/	73.9	/
	8F	47.6	72.9	63.3	60.7	83.7	54.9	92.5
	6F	31.6	43.3	113.7	40.8	58.0	53.2	75.7
	1F	0.0	41.2	/	34.2	/	40.1	/
芸予	11F	73.3	174.0	/	112.1	/	167.3	/
	8F	47.6	129.9	207.2	81.1	195.0	50.4	206.4
	6F	31.6	82.5	333.2	114.0	353.8	56.0	337.3
	1F	0.0	49.8	/	45.3	/	47.1	/

図5 水平最大加速度分布

図6 加速度波形 (NS方向)

図7 建屋の東側と西側の加速度波形の比較 (8階)

(2) ねじれの影響

8階に設置された同一平面内の2つの地震計から得られた観測記録の主要動付近を拡大して図7に示す。鳥取県西部地震では振幅の大きい部分で若干位相ずれが生じており、ねじれの影響が見られる。芸予地震ではNS方向EW方向共ほぼ同位相で振動しており、ねじれの度合いは小さい。

(3) 周波数分布

観測記録の加速度応答スペクトルと伝達関数(フーリエスペクトルの11階/1階の比)とを図8、図9に示す。伝達関数にはハミングウィンドウを施し、平滑化を行っている。

これらのスペクトルを見ると、振動特性が地震ごとに変動しており、建屋とボイラの接触の影響も含まれると思われるが、建屋の卓越周期と見られる0.6秒付近に共通してピークが見られる。芸予地震ではこのピークに加え、入力波に見られる1秒付近のピークが建屋各階にも現れ、鳥取県西部地震とは異なる性状を示している。

鳥取県西部地震の加速度波形は、10秒前後を境に前半と後半に2山の包絡形状を示しているが、この部分の卓越周波数成分の時間的変動を調べるため、ランニング応答スペクトルを計算して図10に

図8 加速度応答スペクトル (h=0.03)

図9 伝達関数 (11F/1F)

示した。図 10 は縦軸に固有周期を取り、横軸に継続時間を取って応答値を濃淡で示したものである。スペクトルのピーク位置の時間経過に伴う変動は小さく、入力波、建屋頂部共に周波数成分の非定常性は見られない。

図 10 加速度ランニング応答スペクトル（鳥取県西部地震）

(4) 建屋ボイラ間の相対変位

観測記録を文献 3) の方法により数値積分して得られた変位波形（計器特性を考慮して 5.0 秒以上の長周期成分をカットしている。）から求めた建屋ボイラ間の相対変形の最大値を表 3 に示す。これらはサイミックタイのギャップ間隔の設計値を越えており、ほとんどの場所で建屋とボイラは接触している状況と見られる。

表 3 建屋ボイラ間の相対変位

		8 階 (cm)	6 階 (cm)
NS	鳥取県西部地震	0.9	0.9
	芸予地震	1.7	2.0
EW	鳥取県西部地震	1.4	0.8
	芸予地震	1.7	1.7

4. シミュレーション解析

(1) 解析モデル

解析モデルは柱、梁、ブレースを部材ごとにモデル化し、各フレーム間を等価なせん断ばねでつなぐことによりねじれ性状を表現した擬似立体精算モデルである。ボイラは質点系の曲げせん断型でモデル化している。柱・梁・ブレース材は弾性とし、サイミックタイにのみ非線形特性を考慮して図 12 に示すようなギャップを持つ非線形ばねでモデル化する。地震計が 1 階床位置に設置してあるので、水平は地盤との相互作用を含んだものと考え、さらに杭を評価した回転ばねは十分大きく固有値に影響がないことを予備解析モデルで確認した上で、基礎はモデル化せず 1 階床を固定とした。振動解析モデルを図 11 に示す。建屋ボイラ非連成時の固有周期は表 4 のとおりであり、観測記録の卓越周期に比べやや長周期側の値となっている。建屋モデルの特性に影響を及ぼす要因としては、ボイラ重量の変動や 2 次部材の影響などが考えられるが、建屋・ボイラの重量と剛性は設計値どおりの値を用い、特に修正は行っていない。

図 11 振動解析モデル

図 12 サイミックタイの履歴特性

表 4 解析モデルの固有周期 (sec) (建屋ボイラ非連成時)

	1 次	2 次	3 次
NS	0.74	0.39	0.30
EW	0.73	0.46	0.31

(2) シミュレーション解析のプロセス

シミュレーション解析においては図 13 に示すフローチャートに従って予備解析を繰返し、応答スペクトルと時刻歴波形の対応の良い条件を求め次のとおりとした。主要なパラメータはサイミックタイの減衰定数・剛性・ギャップ間隔、建屋の減衰定数である。

サイミックタイの減衰定数は建屋とサイミックタイの接触状況によらずゼロと仮定した。サイミックタイのギャップ間隔の設定は建屋とボイラの接触の程度を支配し建物の応答値に影響を及ぼすため、NS 方向は設計値を用いたが EW 方向は一律 0.4cm とした。設定に際しては現地調査を行い、ギャップ間隔が施工精度から見て設計値から 0.2~0.5cm 程度の範囲で変動し得ることを確認している。建屋の減衰定数は建屋ボイラ非連成時の 1 次固有周期に対する値として設計値の 3% よりやや大きめではあるが、5% 内部粘性型とした場合が記録との対応が最も良好であり、この値を用いた。本建物の場合、建屋・ボイラの連成による減衰効果が期待できることがうかがわれる。

(3) 解析結果

解析結果と観測記録との加速度応答スペクトルの比較を図 14 に示す。鳥取県西部地震においてはサイミックタイのない線形解析の結果を合せて示した。解析結果と観測記録では 0.6 秒付近と見られる卓越周期はほぼ対応している。芸予地震に見られる周期 1 秒付近の卓越振動 (NS0.9 秒、EW1.2 秒) は解析結果にも見られるが、この振動モードは解析モデルにはなく、入力波の特性がそのまま建

図 13 シミュレーション解析のフローチャート

屋に表れたものと考えられる。スペクトルピーク値は鳥取県西部地震では2方向共に良い対応を示すが、芸予地震ではややばらつきが見られ、EW方向11階の解析結果が観測記録に比べて大きめの結果となっている。しかし全体的には解析結果は観測記録のスペクトル性状を良く表現している。ここではサイスミックタイのギャップ間隔は細かな変更はせず一律の値を採用したが、実際のギャップ間隔は取付け精度が設置場所ごとに異なるため、対応精度を向上させるにはより細かな設定が必要である。

建屋の応答値は柱、梁、ブレース共いづれも塑性率0.3以下であり、解析結果から見て振動レベルは弾性範囲内である。また、ねじれの影響については8階の同一平面内の2点の波形を比較した結果、観測記録と同様の傾向を示し、その影響は小さいと考えられる。

非線形解析と線形解析の比較からはサイスミックタイの接触によりピークが短周期側に移動し、ピーク値が減少する傾向が見られる。

最大値を含む主要動部分10秒間の加速度波形を観測記録と解析結果で比較して図15に示す。2地震共建屋側、ボイラ側共に良く再現できている。芸予地震では6階ボイラ側に短周期の大きなパルス波形が発生しているが、これは建屋とボイラの接触に伴うボイラ函体の局所的な振動によるものであると考えられ、解析では表現できていない。10Hz以上の短周期成分をフィルタし、この影響を除いた波形と解析結果は比較的良く対応する。

図 14 観測記録と解析結果の加速度応答スペクトルの比較

図 15 観測記録と解析結果の加速度波形比較

5. まとめ

竹原火力発電所3号機ボイラ建屋において観測された鳥取県西部地震および芸予地震の記録のシミュレーション解析を行った。その結果以下のことが判明した。

- 1) 2地震の入力レベルは30~50cm/s²であり、建屋の応答は弾性範囲にある。建屋とボイラはサイスミックタイを介して接触している状況である。
- 2) 観測記録に見られる建屋の卓越周期はNS、EW方向共に0.6秒付近にある。建屋ボイラ非連成時の固有周期より短めであるが、解析結果の卓越周期とはほぼ対応している。
- 3) 設計時の建屋の剛性、重量を用いたフレーム床ばね連結の擬似立体解析モデルにより2つの地震で両方向ともに対応値を概ねシミュレーションすることが可能である。

- 4) サイスミックタイのギャップ間隔が建物全体の応答性状に与える影響は大きく、設計においては適切な評価が重要である。

参考文献

- 1) 加藤正治、三浦俊悦、山田和彦、前田達哉他5名：火力発電所ボイラー建屋の合理的な耐震設計法の開発研究(その1)~(その5)、日本建築学会大会学術講演梗概集 p.1047~1056、1986.8
- 2) 加藤正治、三浦俊悦他1名：火力発電所ボイラー棟の地震応答に関する研究(その1)~(その2)、日本建築学会大会学術講演梗概集、p.983~986、1984.10
- 3) M.D.Trifunac: Low Frequency Digitization Errors and a New Method for Zero Baseline Correction of Strong-Motion Accelerograms, EERL 70-07、1970.9

[2002年10月18日原稿受理 2003年2月25日採用決定]