地震・津波の影響—発電所で観測した地震動と津波

東京電力(株) 土方 勝一郎

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に際して、福島第一原子力発電所および福島第二原子力発電所で確認した地震動と津波についての分析・検討を行った。地震動は、原子炉建屋基礎版上および敷地地盤における観測記録を分析し、基準地震動 S_s との比較を行った。津波は、敷地における調査と、広域の観測記録をもとにした津波インバージョン解析により波源を推定した結果を示す。また、この波源を用いて両発電所に来襲した津波高さの違いの要因を分析した。

I. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震は、関東から北海道の太平洋沿岸に甚大な被害をもたらした。この地震は、日本海溝で発生した地震としては過去に例を見ない巨大なものであり、同地震前に土木学会¹⁾、地震調査研究推進本部²⁾、中央防災会議³⁾で示されていた地震規模を大きく上回るものであった。

この地震の揺れと津波は、福島第一原子力発電所および福島第二原子力発電所に大きな影響をもたらした。地震の揺れ(地震動)については、両発電所の原子炉建屋基礎版上や敷地地盤等に設置された地震計による観測記録の分析から、耐震設計に用いる基準地震動 S_s を大きく上回るものではなかったことを確認した。一方、津波については、両発電所における想定を大きく上回るものであり、特に津波の高さが大きかった福島第一原子力発電所では、全電源喪失の原因となった。

本稿では、地震動について、原子炉建屋基礎版上および敷地地盤における観測記録を分析し、基準地震動 S_s との比較を行った結果を示す。また、津波について、敷地における調査結果を示すとともに、北海道から千葉県に至る広域の痕跡高・遡上高、検潮記録、地殻変動および浸水域の記録をもとに津波インバージョン解析を行い、波源を推定した結果を示す。また、このモデルを用いて、福島第一原子力発電所と福島第二原子力発電所に来襲した津波高さの違いの要因についても分析した。

II. 地震の影響

1. 耐震設計に用いる基準地震動 S_s について

耐震設計に用いる基準地震動 S_s は、2006年に改訂された「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」に基

づき策定されている。福島第一原子力発電所および福島第二原子力発電所における基準地震動 S_s の策定概要を第1図に示す。「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」として、特に敷地に大きな影響を及ぼすと考えられる地震を第1図に示すように発生様式ごとに選定し考慮している。また、「震源を特定せずに策定する地震動」として、詳細な地質学的調査によっても震源位置と地震規模をあらかじめ特定できない地震も考慮している。それらの評価結果に基づき、第1図に示すように、3つの基準地震動 S_s を策定しており、その最大の加速度値は600 galである。なお、基準地震動 S_s は、せん断波速度 $V_s = 700$ m/s 以上の硬い岩盤の上部に地盤がないものとして仮想的に設定する自由表面(以下、解放基盤表面という)において策定している。

S_s-1	<ul style="list-style-type: none"> 「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」のうち、内陸地殻内地震とプレート間地震の評価結果を包絡。 最大加速度振幅: 450 gal
S_s-2	<ul style="list-style-type: none"> 「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」のうち、海洋プレート内地震の評価結果を包絡。 最大加速度振幅: 600 gal
S_s-3	<ul style="list-style-type: none"> 「震源を特定せず策定する地震動」 最大加速度振幅: 450 gal

第1図 福島第一原子力発電所および福島第二原子力発電所における基準地震動 S_s の概要

Effect of Earthquake and Tsunami : Katsuichirou HIJIKATA.

(2012年 4月12日 受理)

2. 原子炉建屋基礎版上における地震動

原子炉建屋においては、第2図に示すように、福島第一原子力発電所および福島第二原子力発電所の全ての号機で観測記録が得られている。原子炉建屋最地下階(基礎版上)で得られた観測記録の最大加速度値を第1表に示す。また、第1表には、第3図に示すように解放基盤表面に基準地震動 S_s を入力した際の原子炉建屋基礎版上の応答を比較のためにあわせて示す。福島第一原子力発電所における観測記録の最大加速度値は、2号機、3号機、5号機の東西方向で、基準地震動 S_s に対する最大応答加速度値を上回った。一方、福島第二原子力発電

(a) 福島第一原子力発電所 (b) 福島第二原子力発電所
第2図 地震観測点の配置

第1表 原子炉建屋基礎版上における観測記録と基準地震動 S_s に対する応答値との比較

観測点 (原子炉建屋 基礎版上)		観測記録の 最大加速度値 (Gal)			基準地震動 S_s に対する 最大応答加速度値 (Gal)		
		南北方向	東西方向	上下方向	南北方向	東西方向	上下方向
福島第一	1号機	460	447	258	487	489	412
	2号機	348	550	302	441	438	420
	3号機	322	507	231	449	441	429
	4号機	281	319	200	447	445	422
	5号機	311	548	256	452	452	427
	6号機	298	444	244	445	448	415
福島第二	1号機	254	230	305	434	434	512
	2号機	243	196	232	428	429	504
	3号機	277	216	208	428	430	504
	4号機	210	205	288	415	415	504

※ 太字で示す観測記録の最大加速度値は、基準地震動 S_s に対する最大応答加速度値を上回っている。

(a) 福島第一 2号機 東西方向

所における観測記録の最大加速度値は、全ての号機で基準地震動 S_s に対する最大応答加速度値を下回った。

それぞれの発電所の中で、水平方向の加速度が最大となった福島第一 2号機東西方向および福島第二 3号機南北方向の応答スペクトルを基準地震動 S_s に対する応答と比較して第4図に示す。福島第一原子力発電所における観測記録の応答スペクトルは、一部の周期帯で基準地震動 S_s に対する応答スペクトルを上回っているものの、おおむね同程度であった。一方、福島第二原子力発電所における観測記録の応答スペクトルは、福島第一原子力発電所のそれよりも全体的に小さく、基準地震動 S_s に対する応答スペクトルを下回るものであった。

3. 解放基盤表面における地震動の推定

敷地地盤においては、第2図に示すように福島第一原子力発電所では2箇所、福島第二原子力発電所では1箇所、地中に設置した地震計による観測記録が得られている。解放基盤表面において策定された基準地震動 S_s と観測記録の比較を行うため、第5図に示すように、O.P. (小名浜港工事基準面) - 200 m の地中での観測記録から解放基盤表面(福島第一: O.P. - 196m, 福島第二: O.P. - 168m)における地震動(以下、はざとり波という)を推定した。福島第一自由地盤系南地点および福島第二自由地盤系における推定結果の応答スペクトルを基準地震動 S_s と比較して第6図に示す。推定されたはざとり波の応答スペクトルは、福島第一原子力発電所および福島

第3図 基準地震動 S_s に対する原子炉建屋の応答の概念図

(b) 福島第二 3号機 南北方向

第4図 原子炉建屋基礎版上における応答スペクトルの比較

第二原子力発電所のいずれの地点においても、一部の周
期帯で基準地震動 S_s を超えているものの、大きく上回

るものではなかったことが確認された。

Ⅲ．津波の影響

1. 津波調査結果

福島第一原子力発電所および福島第二原子力発電所
において、東北地方太平洋沖地震に伴う津波の浸水域・浸
水高・浸水深を把握するため、両発電所の建屋や斜面等
に残された津波の痕跡について調査を行った。福島第一
原子力発電所の調査結果を第7図に、福島第二原子力発
電所の調査結果を第8図に示す。なお、潮位計及び波高
計は、地震あるいは津波によって損傷し十分な記録は取
得できなかった。

第5図 解放基盤表面における地震動推定の概念図

(a) 福島第一 自由地盤系南地点 (水平方向)

(b) 福島第二 自由地盤系 (水平方向)

第6図 はざとり波と基準地震動 S_s の応答スペクトルの比較

第7図 福島第一原子力発電所における津波調査結果

第8図 福島第二原子力発電所における津波調査結果

福島第一原子力発電所においては、海側エリア(敷地高 O.P. + 4 m)から斜面を超えて主要建屋設置エリア(敷地高 O.P. + 10 及び 13 m)への遡上により、ほぼ全域が浸水した。浸水高は、1～4号機側主要建屋設置エリア(敷地高 O.P. + 10 m)で O.P. 約 + 11.5～約 + 15.5 m (浸水深約 1.5～約 5.5 m)、5, 6号機側主要建屋設置エリア(敷地高 O.P. + 13 m)で O.P. 約 + 13～約 + 14.5 m (浸水深約 1.5 m 以下)であった。なお、1～4号機側主要建屋設置エリア南西部では、局所的に浸水高が O.P. 約 + 16～約 + 17 m (浸水深約 6～約 7 m)であった。

福島第二原子力発電所においては、海側エリア(敷地高 O.P. + 4 m)から斜面を超えて主要建屋設置エリア(敷地高 O.P. + 12 m)への遡上は認められず、主要建屋設置エリアには南東側の道路から集中的に遡上し、1, 2号機の建屋周辺及び3号機の建屋南側が浸水した。4号機の建屋周辺には浸水しなかった。浸水高は、海側エリア(敷地高 O.P. + 4 m)で O.P. 約 7 m (浸水深約 3 m)、主要建屋設置エリア(敷地高 O.P. + 12 m)で O.P. 約 + 12～約 + 14.5 m (浸水深約 2.5 m 以下)であった。なお、1号機側建屋南側から免震重要棟にかけて、局所的に浸水高が O.P. 約 + 15～約 + 16 m (浸水深約 3～約 4 m)であった。

このように、福島第一原子力発電所と福島第二原子力発電所では、来襲した津波の規模に差異が認められた。なお、津波に関する用語は以下の定義で用いている。

- ・津波の高さ： 平常潮位から海面が上昇した高さ
- ・浸水高： 建物や設備に残された痕跡の基準面からの高さ
- ・浸水深： 建物や設備に残された痕跡の地表面からの高さ
- ・遡上高： 遡上した津波の痕跡のうち、最も内陸のもの基準面からの高さ

2. 津波波源モデルの推定と再現計算結果

東北地方太平洋沖地震に伴う津波について、広域(北海道～千葉県)の津波観測記録を最もよく説明できる津波波源モデルを推定した。波源モデルは、約 500 km × 約 200 km の領域を 80 ブロックに分割し、ブロックごとの最適すべり量分布を、津波インバージョン解析により求めた。津波インバージョン解析では、浸水高・遡上高、検潮記録、地殻変動及び浸水域を再現できる断層面のすべりの位置と大きさを、津波数値シミュレーションから逆算して求めた。その結果得られたマグニチュードは Mw 9.1 であり、地震動の検討から得られた地震規模 Mw 9.0 (例えば気象庁⁴⁾) と同等となった。また、最大すべり量は 56.7 m であった。すべり量分布を第 9 図に示す。すべり量が大きい領域は、プレート間海溝沿いの領域では宮城県沖から福島県沖にかけて、プレート間のや

第9図 インバージョンにより推定した波源モデルのすべり量分布

や深い領域では宮城県沖に分布している。プレート間海溝沿いの領域からは、いわゆる津波地震タイプの相対的に周期の短い津波が、プレート間のやや深い領域からは、いわゆるプレート間地震タイプの相対的に周期の長い津波が形成される。なお、第9図においては、80ブロックをさらに細分化した格子を示した。これは、再現計算において、プレート境界面の凹凸に応じて、細分化した格子ごとに異なる傾斜を与えるための分割である。

推定した波源モデルを用いて津波の再現計算を行った結果、北海道から千葉県に至る広域の痕跡高・遡上高、検潮記録、地殻変動及び浸水域の記録をバランス良く再現するとともに、両発電所敷地内の浸水高及び浸水域をよく再現できていることを確認した。再現計算結果による両発電所の検潮所設置位置における津波の高さは、福島第一原子力発電所でO.P.約+13 m、福島第二原子力発電所でO.P.約+9 mであった。

再現計算結果を用いて、福島第一原子力発電所と福島第二原子力発電所における津波の分析を行った結果、ピーク水位は、津波地震タイプからの波とプレート間地震タイプからの波の重ね合わせが主要因となり、形成されていることがわかった(第10図)。すなわち、発電所のピーク水位の形成に大きく寄与しているのは、第9図に位置を示す、福島県沖のプレート間海溝沿い領域を波源とする津波地震タイプからの波と、宮城県沖のやや深いプレート間領域を波源とするプレート間地震タイプからの波である。なお、今回の津波インバージョン解析の結果で、すべり量が最大となったブロックからの波は、発電所におけるピーク水位の時刻よりも遅れて到達するため、ピークの形成には寄与していない。

福島第一原子力発電所と福島第二原子力発電所における津波の規模の差異については、第10図から、福島県沖の津波地震タイプによる波と宮城県沖のプレート間地震タイプによる波について、福島第一原子力発電所では2つの波の重なり度合いが強く、福島第二原子力発電所で

第10図 福島第一と福島第二の津波高さの差異
(沖合水深約150 m 地点)

は重なり度合いが弱いことが、来襲した津波の規模の違いの主要因であったと考えられる。

— 参 考 資 料 —

- 1) 土木学会，原子力発電所の津波評価技術，(2002.2)。
- 2) 地震調査研究推進本部，三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価について，(2002.7)。
- 3) 中央防災会議，日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会：強震動及び津波高さの推計について，(2005.6)。
- 4) 気象庁，「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震」について(第28報)，(2011.3)。

著 者 紹 介

土方勝一郎(ひじかた・かついちろう)
東京電力㈱
(専門分野/関心分野)耐震設計，地震動評価，構造物の振動解析