

本資料のうち、枠囲みの内容は、機密事項に属しますので公開できません。

柏崎刈羽原子力発電所第7号機 工事計画審査資料	
資料番号	KK7 補足-025-1 改5
提出年月日	2020年5月27日

原子炉建屋の地震応答計算書に関する補足説明資料

2020年5月

東京電力ホールディングス株式会社

1. 工事計画添付書類に係る補足説明資料

V-2-2-1「原子炉建屋の地震応答計算書」の記載内容を補足するための資料を以下に示す。なお、他建物・構築物の地震応答計算書の記載内容を共通的に補足する内容についても、本資料で代表し説明する。

別紙 1 地震応答解析における既工認と今回工認の解析モデル及び手法の比較

別紙 2 地震応答解析における耐震壁のせん断スケルトン曲線の設定

別紙 3 地震応答解析における材料物性の不確かさに関する検討

別紙 4 地震応答解析に用いる鉄筋コンクリート造部の減衰定数に関する検討

別紙 5 地震応答解析における原子炉建屋の重大事故等時の高温による影響

別紙 6 原子炉建屋のコンクリート剛性に対する地震観測記録による傾向分析

下線：今回ご提示資料

別紙6 原子炉建屋のコンクリート剛性に対する地震観測記録による
傾向分析

目 次

1. 検討の概要	別紙 6-1
2. 解析手法の概要	別紙 6-2
3. 評価結果	別紙 6-4
3.1 評価対象地震	別紙 6-4
3.2 伝達関数の算定条件	別紙 6-6
3.3 評価結果	別紙 6-8
4. まとめ	別紙 6-12

別紙6-1 コンクリートの経年劣化の影響について

1. 検討の概要

原子炉建屋のコンクリート剛性に対する地震観測記録による傾向分析について、6号機原子炉建屋と7号機原子炉建屋の高さ及び平面形状が共通であることを踏まえ、代表として6号機原子炉建屋で地震観測を行ってきたことから、6号機原子炉建屋の観測記録を用いて、建屋を等価1質点系モデルに置換した場合の1次固有振動数を算定し、経年及び地震による建屋全体系の剛性（コンクリート剛性）への影響という観点で分析を行った。1次固有振動数の変化から、6号機原子炉建屋全体の平均的な剛性の変化を評価することができる。

2. 解析手法の概要

6号機原子炉建屋の1次固有振動数を評価するための伝達関数の概念図を図2-1に示す。

基礎スラブ上の水平動の加速度記録に加えて、基礎スラブ両端部の鉛直動の加速度記録を用いることにより、基礎スラブを剛体とみなして基礎スラブの回転動を評価することにより基礎固定条件の伝達関数を評価することができる。また、基礎スラブ上の水平動の加速度記録のみを用いる場合には基礎スラブの水平方向のみを固定条件としたスウェイ固定条件の伝達関数を評価することができる。

図2-2にスウェイ固定の場合の固有振動数評価の概念を示す。

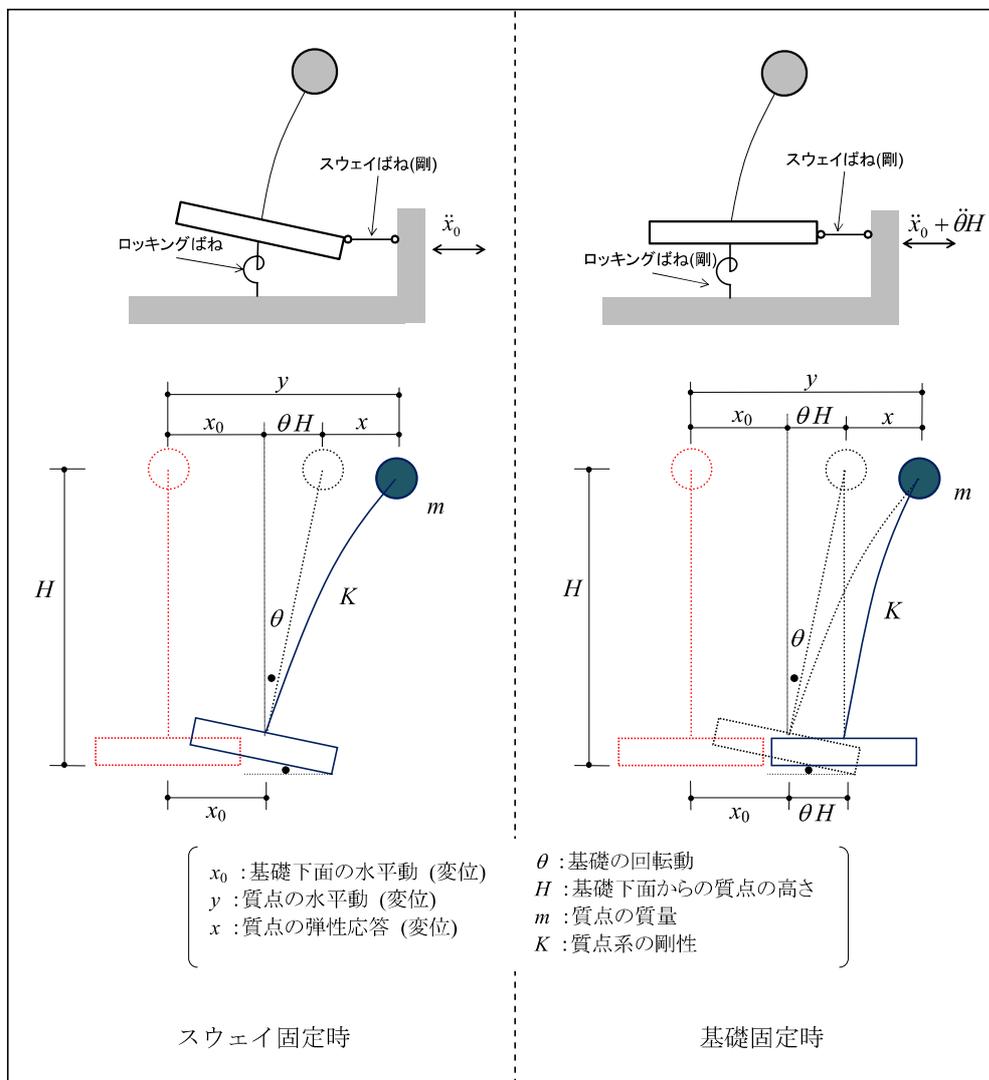
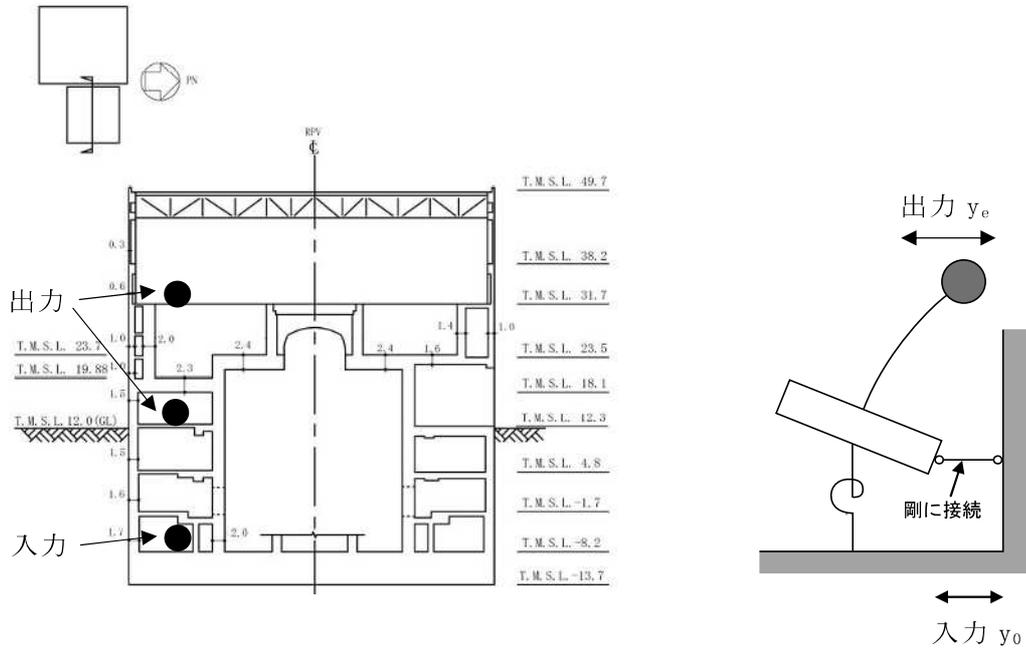


図2-1 伝達関数の概念図



- ① 質点系の等価高さ位置に隣接する上下階の観測波形を線形補間して等価高さ位置の波形を算定する。
- ② 観測記録による伝達関数に対して固有振動数を同定して求める。

図 2-2 固有振動数評価の概念図 (スウェイ固定)

3. 評価結果

3.1 評価対象地震

6号機原子炉建屋では多数の地震が観測されている。基礎スラブ上のNS方向またはEW方向の最大加速度が 3cm/s^2 以上である82地震記録を評価対象として選定した。評価対象地震を表3-1に示す。

表 3-1 ARX 法による伝達関数の評価対象地震

No.	地震名	規模 M	深さ (km)	震央距離 (km)	震源距離 (km)	加速度最大値 (cm/s ²)			
						4F 計測点		B3F 計測点	
						NS	EW	NS	EW
01	1995.08.09 04:27 新潟県南部沖	4.6	24	27	36	7.07	7.02	3.12	5.00
02	1996.08.31 10:43 新潟県南部沖	3.0	19	6	20	12.44	16.97	6.79	8.91
03	1998.02.21 09:55 新潟県中部	5.2	19	25	31	16.11	11.80	8.36	6.32
04	1998.04.04 01:40 新潟県南部沖	4.6	26	23	35	39.18	34.08	16.74	19.60
05	1998.11.16 08:08 能登半島沖	4.8	12	108	108	11.01	7.15	3.99	3.64
06	1999.11.14 06:57 新潟県中部	4.0	13	16	20	9.26	9.05	4.49	4.27
07	2000.03.25 22:02 新潟県中部	4.1	11	18	21	11.43	6.97	6.28	4.54
08	2001.01.02 19:53 新潟県中部	4.5	12	19	22	7.90	7.64	4.05	3.83
09	2001.01.04 13:18 新潟県中部	5.3	11	54	55	15.71	11.74	4.54	7.67
10	2003.12.22 21:07 佐渡島近海	4.7	16	60	62	2.54	5.66	1.28	3.18
11	2004.03.15 07:38 新潟県南部沖	4.7	24	31	39	26.17	13.25	8.43	8.14
12	平成16年(2004年)新潟県中越地震	6.8	13	28	31	74.02	94.62	34.20	59.71
13	2004.10.23 17:59 新潟県中部	5.3	16	26	30	13.90	13.37	7.23	9.60
14	2004.10.23 18:03 新潟県中部	6.3	9	35	36	51.45	55.83	27.05	24.92
15	2004.10.23 18:07 新潟県中部	5.7	15	25	29	25.74	18.27	9.10	13.10
16	2004.10.23 18:11 新潟県中部	6.0	12	28	30	35.52	48.63	16.42	34.44
17	2004.10.23 18:14 新潟県中部	4.5	14	28	31	8.61	5.79	4.17	5.10
18	2004.10.23 18:34 新潟県中部	6.5	14	32	35	101.09	93.39	41.93	52.41
19	2004.10.23 18:36 新潟県中部	5.1	7	36	37	8.89	16.98	3.49	9.76
20	2004.10.23 18:57 新潟県中部	5.3	8	34	35	8.97	5.65	6.65	4.59
21	2004.10.23 19:36 新潟県中部	5.3	11	31	33	6.77	12.48	4.74	8.82
22	2004.10.23 19:45 新潟県中部	5.7	12	29	31	27.53	20.71	11.74	15.31
23	2004.10.23 19:46 新潟県中部	4.7	15	29	33	8.13	8.70	3.21	8.17
24	2004.10.23 23:34 新潟県中部	5.3	20	30	36	13.86	17.34	7.40	7.32
25	2004.10.24 16:06 新潟県中部	4.6	12	30	32	5.50	7.01	2.57	5.13
26	2004.10.25 00:28 新潟県中部	5.3	10	35	36	11.09	9.53	6.06	7.85
27	2004.10.25 06:04 新潟県中部	5.8	15	33	36	35.36	46.28	19.60	33.82
28	2004.10.25 06:32 新潟県中部	4.3	15	32	35	5.78	6.75	2.69	3.56
29	2004.10.27 10:40 新潟県中部	6.1	12	41	43	41.72	50.27	27.04	34.51
30	2004.11.01 04:35 新潟県中部	5.0	8	36	37	7.11	9.96	4.19	5.66
31	2004.11.04 08:57 新潟県中部	5.2	18	28	34	112.42	115.76	46.55	84.07
32	2004.11.08 11:15 新潟県中部	5.9	0	39	39	17.58	16.78	6.49	8.27
33	2004.11.08 11:27 新潟県中部	5.0	0	38	38	7.58	8.00	4.14	4.62
34	2004.11.10 03:43 新潟県中部	5.3	5	36	37	9.55	8.87	4.75	4.83
35	2004.12.23 21:03 新潟県中部	4.5	11	32	33	8.49	13.10	2.92	5.63
36	2004.12.25 10:23 新潟県中部	4.4	10	32	34	7.17	15.85	3.50	6.19
37	2005.06.20 13:03 新潟県中部	5.0	15	22	26	43.57	56.54	23.34	28.11
38	2005.08.21 11:29 新潟県中部	5.0	17	17	24	13.07	19.85	6.78	11.22
39	2005.11.04 01:01 新潟県南部沖	4.8	28	11	30	47.02	42.96	25.51	30.80
40	2006.12.26 05:17 佐渡島近海	4.9	14	63	65	10.41	9.37	5.52	5.66
41	2007.01.08 18:59 新潟県中部	4.8	13	34	36	5.18	6.26	2.99	3.46
42	2007.03.25 09:41 能登半島沖	6.9	11	171	171	47.91	26.00	20.93	16.87
43	平成19年(2007年)新潟県中越沖地震	6.8	17	15	22	544.41	544.99	271.01	321.68
44	2007.07.16 11:00 新潟県南部沖	3.7	22	5	23	41.70	40.69	24.17	20.72
45	2007.07.16 11:05 新潟県南部沖	3.9	23	13	26	10.36	9.21	4.26	3.49
46	2007.07.16 11:12 新潟県南部沖	3.3	24	12	27	6.31	3.67	3.07	2.74
47	2007.07.16 11:15 新潟県南部沖	2.5	17	5	18	6.28	5.83	3.81	3.83
48	2007.07.16 11:20 新潟県南部沖	3.1	20	9	22	7.82	16.84	5.00	6.72
49	2007.07.16 11:47 新潟県南部沖	3.4	18	6	19	4.50	4.75	1.96	3.28
50	2007.07.16 11:50 新潟県南部沖	3.5	19	6	20	11.08	11.85	5.57	6.58
51	2007.07.16 11:56 新潟県南部沖	3.5	17	8	18	13.28	21.85	5.48	10.21
52	2007.07.16 12:20 新潟県南部沖	3.4	20	11	23	6.34	5.52	2.99	3.01
53	2007.07.16 12:34 新潟県南部沖	2.9	18	15	24	6.36	7.74	2.65	4.04
54	2007.07.18 11:47 新潟県南部沖	3.7	18	6	19	37.39	24.52	19.53	15.71
55	2007.07.18 16:53 新潟県中部	4.3	23	3	23	16.82	22.49	6.34	11.39
56	2007.07.20 01:52 新潟県南部沖	4.2	19	5	20	39.55	59.49	24.58	25.79
57	2007.07.25 06:52 新潟県中部	4.8	24	16	29	75.06	41.84	41.70	35.18
58	2008.03.12 17:59 新潟県南部沖	4.1	20	4	20	22.05	23.62	11.98	14.94
59	2008.05.12 01:53 新潟県南部沖	2.6	19	7	20	6.41	6.66	3.25	4.32
60	2008.07.05 08:30 新潟県南部沖	3.3	17	16	24	4.25	6.21	2.13	3.16
61	2008.12.30 23:25 新潟県中部	3.9	17	4	18	24.08	25.46	12.30	11.36
62	2009.08.24 13:30 新潟県南部沖	3.6	19	3	19	17.27	23.47	9.22	10.23
63	2010.10.02 12:35 新潟県中部	4.0	22	35	42	11.24	14.87	4.75	6.38
64	2010.10.03 06:37 新潟県中部	4.5	23	35	42	25.52	12.14	10.05	5.98
65	2010.10.03 06:52 新潟県中部	4.6	24	36	43	11.74	12.48	8.01	4.13
66	2010.10.03 09:26 新潟県中部	4.7	22	35	42	8.07	7.32	3.60	4.16
67	平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震	9.0	24	383	383	12.47	13.24	12.27	11.64
68	2011.03.11 15:15 茨城県東方はるか沖	7.6	43	278	280	4.32	4.37	4.24	3.90
69	2011.03.12 03:59 新潟県中部	6.7	8	49	49	31.13	32.02	15.39	19.67
70	2011.03.12 04:31 新潟県中部	5.9	1	53	53	8.73	5.96	4.19	3.40
71	2011.04.07 23:32 宮城県東方沖	7.2	66	305	311	3.11	4.92	2.67	4.03
72	2011.04.11 17:16 福島県東部	7.0	6	192	192	5.72	5.26	5.09	4.80
73	2011.04.12 07:26 長野県北部	5.6	0	67	67	14.63	11.40	6.48	7.02
74	2011.04.12 16:14 長野県北部	4.6	1	66	66	7.34	7.28	4.07	4.49
75	2011.07.27 01:49 新潟県中部	3.7	18	4	19	16.88	18.42	10.12	8.28
76	2011.11.26 09:05 佐渡島近海	4.3	24	45	50	5.44	7.43	2.33	3.47
77	2012.02.08 21:01 佐渡島近海	5.7	14	62	63	17.76	8.40	7.38	4.48
78	2012.07.10 12:48 長野県北部	5.2	9	68	69	5.30	5.02	2.04	3.29
79	2014.04.08 05:07 新潟県中部	4.4	9	32	33	5.52	7.40	3.36	2.16
80	2014.11.22 22:08 長野県北部	6.7	5	103	103	6.76	13.77	5.22	9.61
81	2015.06.16 13:42 新潟県南部沖	3.8	18	11	21	5.60	5.66	3.10	3.37
82	2016.11.22 05:59 福島県東方沖	7.4	25	266	266	3.85	4.72	3.11	4.25

* 平成19年(2007年)新潟県中越沖地震(No. 43)は新設地震計(3F, B3F)の加速度最大値

3.2 伝達関数の算定条件

表 3-2 及び図 3-1 に伝達関数の算定に用いた地震計を示す。等価高さ位置の波形は T.M.S.L.+31.7m と T.M.S.L.+12.3m の記録を用いて線形補間により算定した。なお、平成 19 年(2007 年)新潟県中越沖地震については、6-R1 および 6-R2 における観測記録を用いてスウェイ固定の伝達関数を算定した。

表 3-2 伝達関数の算定に用いた地震計

観測点名・成分・高さ位置		備考
NS 成分	EW 成分	
R62 NS (T.M.S.L.+31.7m) R66 NS (T.M.S.L.+31.7m) R63 NS (T.M.S.L.+12.3m) 6-R1 NS (T.M.S.L.+23.5m)*	R62 EW (T.M.S.L.+31.7m) R66 EW (T.M.S.L.+31.7m) R63 EW (T.M.S.L.+12.3m) 6-R1 EW (T.M.S.L.+23.5m)*	y_e 算定用 T.M.S.L.+31.7m の記録の平均値と T.M.S.L.+12.3m の線形補間により算定
R64 NS (T.M.S.L.- 8.2m) R67 NS (T.M.S.L.- 8.2m) R69 NS (T.M.S.L.- 8.2m) 6-R2 NS (T.M.S.L.- 8.2m)*	R64 EW (T.M.S.L.- 8.2m) R67 EW (T.M.S.L.- 8.2m) R68 EW (T.M.S.L.- 8.2m) 6-R2 EW (T.M.S.L.- 8.2m)*	y_0 算定用 記録の平均化により算定
R64 UD (T.M.S.L.- 8.2m) R68 UD (T.M.S.L.- 8.2m)	R67 UD (T.M.S.L.- 8.2m) R69 UD (T.M.S.L.- 8.2m)	回転動算定用

*平成 19 年(2007 年)新潟県中越沖地震では既設地震計の観測記録データの一部が消失したことから新設地震計(6-R1, 6-R2)の観測記録のみを使用(スウェイ固定)

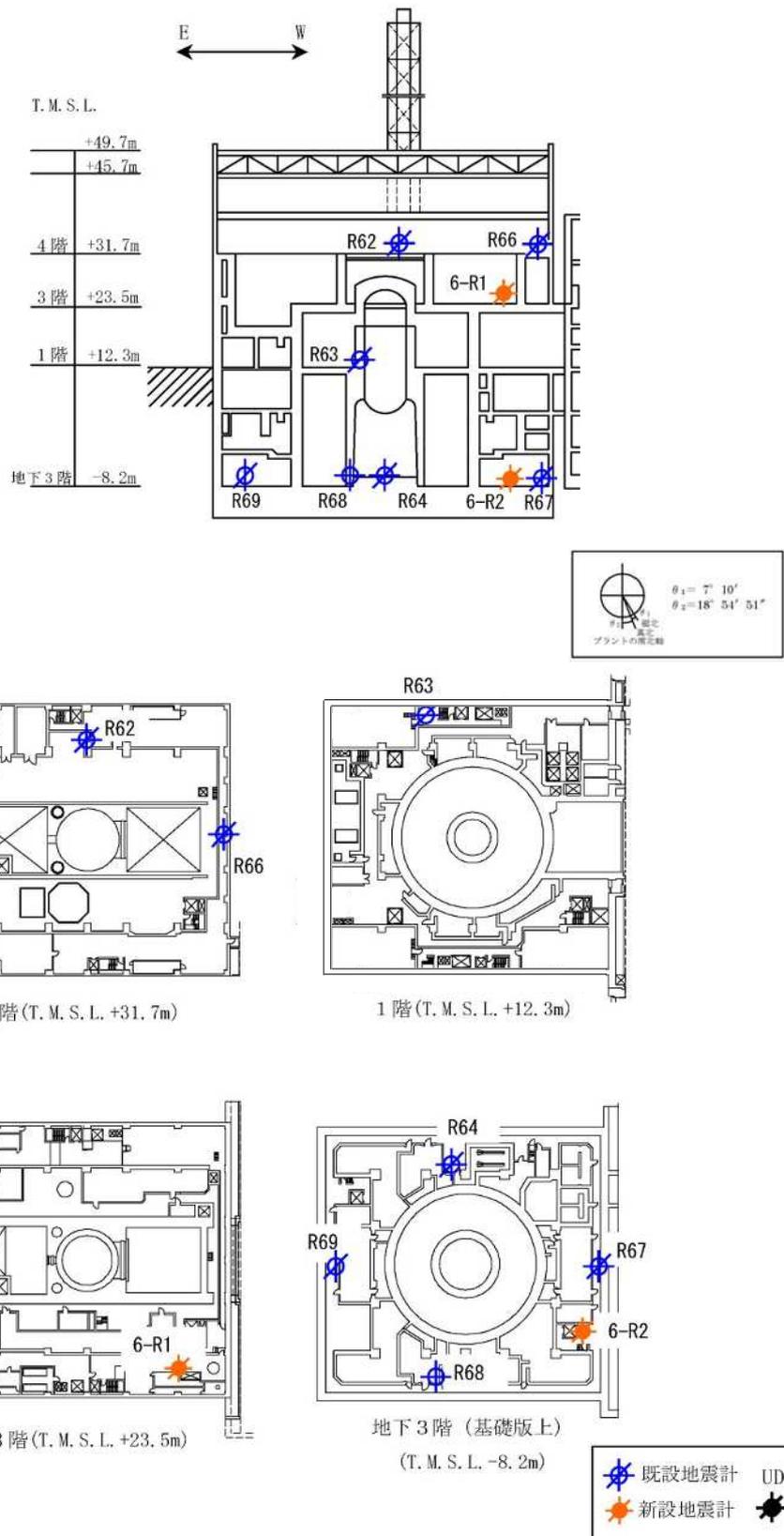


図 3-1 6号機原子炉建屋の地震計位置

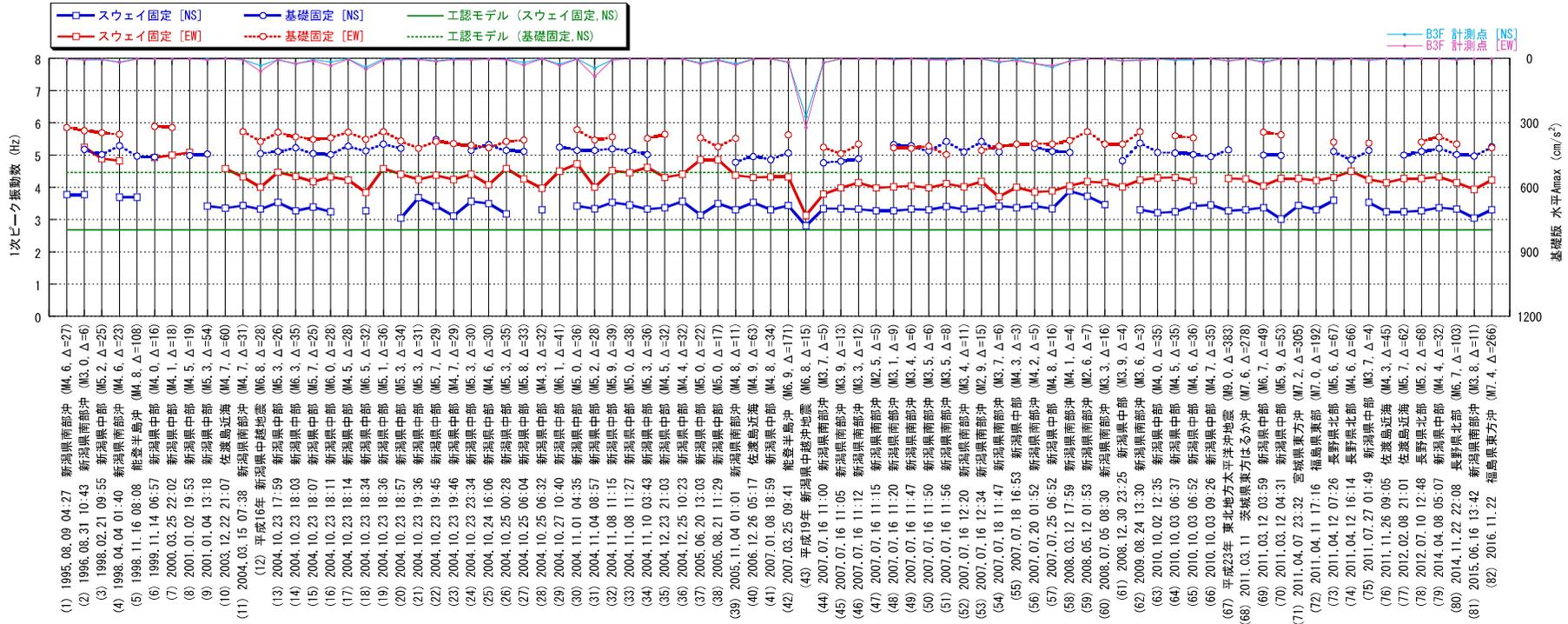
3.3 評価結果

1次固有振動数の地震時系列上の変化を図3-2に、時間軸上の変化を図3-3に示す。これらの図には、スウェイ固定条件及び基礎固定条件における1次固有振動数の変化を重ねて表示している。但し、地震記録の精度の制約により、評価が困難なケースは除いた。地盤の影響を除去した基礎固定時の方が1次固有振動数は高く評価されていることが確認できる。なお、図には参考として、原子炉建屋の今回工認で使用している地震応答解析モデル（以下「工認モデル」という。）をスウェイ固定と基礎固定とした場合のNS方向の1次固有振動数（Sd-1）及び基礎スラブ上の観測記録の水平最大加速度も併記している。また、ARX法（同定結果）とフーリエ解析による伝達関数（観測結果）の比較例として、平成19年（2007年）新潟県中越沖地震と平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震の結果を図3-4に示す。

図3-2によれば、加速度の大きい地震記録に対しては1次固有振動数が一時的に変化する傾向が見られるが、その他殆どの地震では概ね同程度の1次固有振動数になっている。

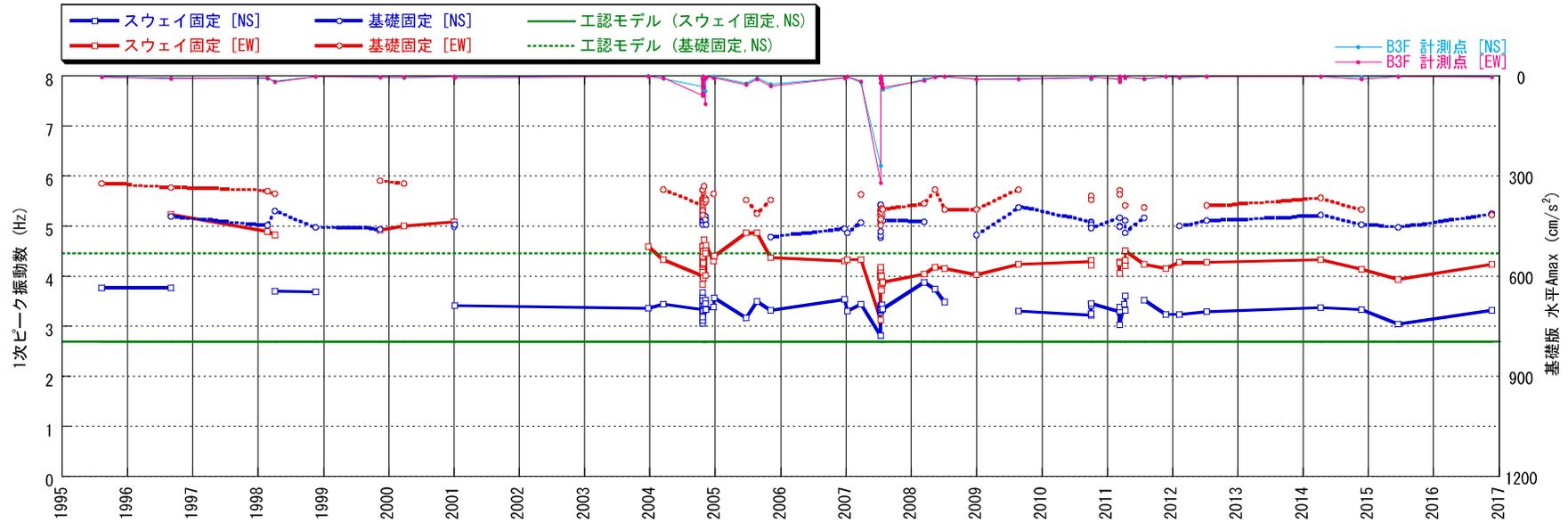
図3-3の時間軸上での変化をみると、平成19年（2007年）新潟県中越沖地震時を除くと、1次固有振動数は長期間に渡ってほぼ一定になっており、経年による剛性低下はみられない。

工認モデルの結果と比較すると、スウェイ固定時の場合は、弾性設計用地震動 Sd-1 と応答レベルが概ね同等と推定される平成19年（2007年）新潟県中越沖地震の結果と概ね対応している。一方、基礎固定時の場合は、ARX法による同定結果は工認モデルの結果よりも若干高い振動数となっている。これは、ARX法による同定結果は微小変形が生じるひずみレベルの地震記録により得られた結果であり、工認モデルと比較して、工認モデルに考慮した耐震壁や補助壁以外の壁の剛性が付与されることが要因であると考えられる。



注：地震記録の精度により ARX 法で適切に評価できないケースは除外し，その箇所は線で結んでいない。

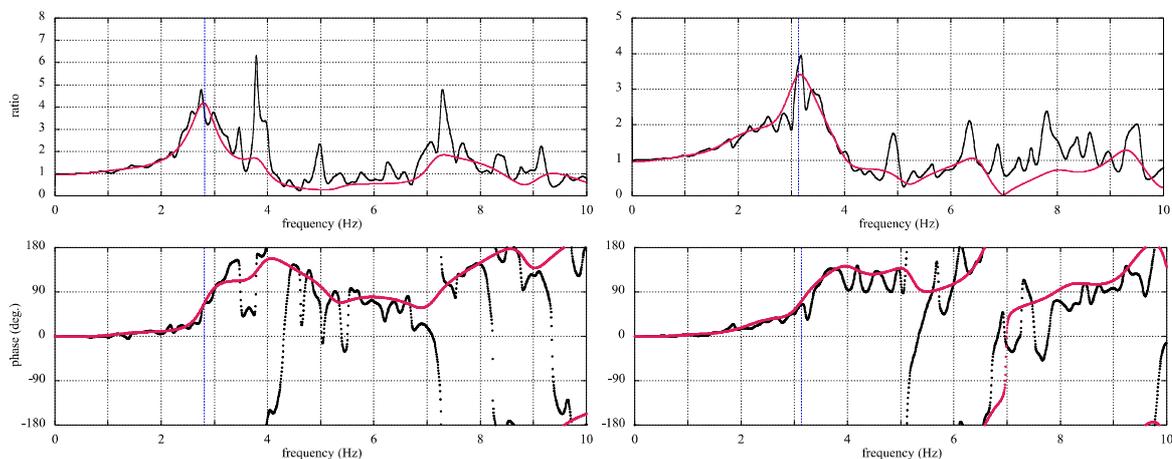
図 3-2 1 次固有振動数の評価結果（地震時系列）



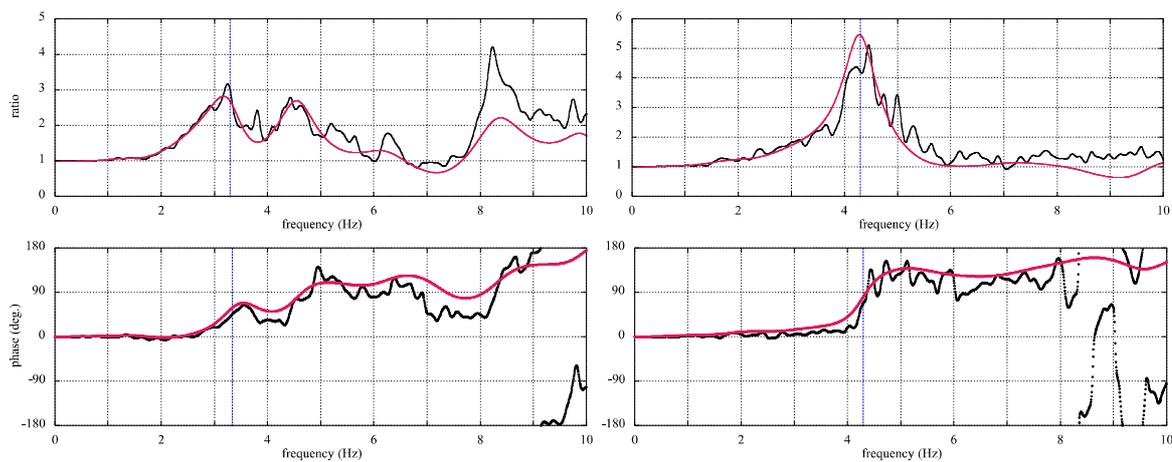
注：地震記録の精度により ARX 法で適切に評価できないケースは除外し，その箇所は線で結んでいない。

図 3-3 1 次固有振動数の評価結果 (時間軸)

黒線：フーリエ解析による伝達関数
 赤線：ARX 法による伝達関数
 青線：ARX 法による固有振動数位置



平成 19 年（2007 年）新潟県中越沖地震（左：NS 成分，右：EW 成分）



平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震（左：NS 成分，右：EW 成分）

図 3-4 ARX 法（同定結果）とフーリエ解析による伝達関数（観測結果）の比較結果
 （各図上段：振幅比，下段：位相）

4. まとめ

6号機原子炉建屋を対象に、地震観測記録を用いて1次固有振動数を算定し、その経年変化の分析を行った。その結果、平成19年(2007年)新潟県中越沖地震時では1次固有振動数が一時的に変化したものの、その他の地震では長期間に渡りほぼ一定の1次固有振動数となっており、経年による変化は殆ど認められなかった。

別紙6-1 コンクリートの経年劣化の影響について

目 次

1. はじめに	別紙 6-1-1
2. 乾燥収縮によるひび割れについて	別紙 6-1-2
3. ひび割れ点検	別紙 6-1-3
3.1 点検概要	別紙 6-1-3
3.2 点検結果	別紙 6-1-4

1. はじめに

柏崎刈羽原子力発電所では、建築物に要求される機能を供用期間にわたって維持するため、定期的な点検に基づく維持管理を実施している。

維持管理においては、コンクリート構造物の性能を低下させるような劣化事象が生じているか否かを確認する各種点検に加え、日常的に劣化の兆候を確認するための外観目視点検およびひび割れ点検を実施している。

ひび割れは、「進行性のないもの」および「進行性のもの」の大きく二つに分類でき、進行性のないものは、乾燥収縮によるもの、セメントの水和熱によるもの、施工に関わるものなどがあり、進行性のものは、アルカリ骨材反応、凍結融解、コンクリートの中性化、塩分浸透、疲労によるものなどがある。

進行性のないひび割れのうち、乾燥収縮によるものは、それ自体が構造安全性に影響を及ぼすものではないが、他の劣化要因と複合し、進行性のひび割れに変化する可能性があるため、柏崎刈羽原子力発電所では、進行性の有無に関係なくひび割れの点検を行い、経年的なひび割れの進展がないことを確認している。

2. 乾燥収縮によるひび割れについて

一般に、コンクリート構造物のひび割れの原因の多くは、材料・調合に関係しており、特に調合とひび割れとの関連は大きく、構造物のおかれる環境、施工時期及び施工方法などを十分勘案した上で、適切な調合設計を行うことがひび割れ対策上重要であるとされている。

コンクリートの調合上、乾燥収縮に大きな影響を及ぼすのは単位水量であり、日本建築学会「鉄筋コンクリート造のひび割れ対策（設計・施工）指針・解説（1990）」においては、調合設計時の乾燥収縮率の目標値を 6×10^{-4} 、単位水量を原則 170kg/m^3 以下と規定している。

また、日本建築学会「高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針（案）・同解説（1991）」においては、耐久性を考慮して高品質のコンクリートを製造する目的から、単位水量を 175kg/m^3 以下、乾燥収縮率を 7×10^{-4} と規定している。

7号機原子炉建屋に使用しているコンクリートは、乾燥収縮率の管理目標値として 6×10^{-4} を採用し、基本調合における単位水量は 160kg/m^3 以下であり、調合設計時に実施した長さ変化試験（JIS A 1129 モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法）において、乾燥収縮率は 6×10^{-4} を満足する結果が得られている。さらに、コンクリートに使用している骨材は、一般にコンクリートの単位水量が小さくなり、乾燥収縮率も小さくなるとされている天然骨材（川砂・川砂利）である。

以上より、7号機原子炉建屋のコンクリートは、乾燥収縮による顕著なひび割れはないと考えられる。

3. ひび割れ点検

3.1 点検の概要

柏崎刈羽原子力発電所では、鉄筋コンクリート構造物を対象に定期的にひび割れ点検を実施しており、ひび割れの点検及び管理については、日本建築学会「原子力施設における建築物の維持管理指針・同解説」を参考に、「原子力発電所建築設備点検マニュアル」により、表 3-1 及び表 3-2 の通り実施している。

表 3-1 ひび割れ点検調査内容

調査項目	調査内容
パターン 幅 長さ	規則性、形態、発生部位（分布）、進行性、漏水の有無 最大幅の測定（クラックスケールによる）、可視範囲の記録

表 3-2 ひび割れ点検管理内容

--

* 構造上の影響が懸念されるひび割れについては、ひび割れ幅によらず補修を実施する。

3.2 点検結果

7号機原子炉建屋における耐震壁のひび割れ点検結果を表3-3に示す。

既往の点検・評価報告書*1及びひび割れ補修報告書*2によると、2007年の新潟県中越沖地震において、7号機原子炉建屋に地震により発生したことが否定できない耐震壁のひび割れが11箇所確認されており、それらは全数補修を完了している。

また、それ以外のひび割れについては、新潟県中越沖地震前と同様、補修の検討対象とはならない0.8mm未満のひび割れ幅を保持していたため、継続的な経過観察対象とし、地震後も補修は行っていない。したがって、経過観察対象となるひび割れの数は、新潟県中越沖地震前後で同数となっている。

なお、経過観察対象のひび割れについて、2007年及び2017年の点検結果を比較すると、ひび割れの状況に大きな変化はなく、経年による進展は認められなかった。

表3-3 7号機原子炉建屋 耐震壁ひび割れ点検結果

--

* ()内は地震により発生したことが否定できない耐震壁のひび割れの数を表している。

- 注記*1 : 平成 20 年 9 月 25 日に経済産業省原子力安全・保安院報告済
「柏崎刈羽原子力発電所 7 号機に関する新潟県中越沖地震後の設備健全性に
係る点検・評価報告書（建物・構築物編）（改訂 1）」
- *2 : 平成 21 年 2 月 18 日に経済産業省原子力安全・保安院報告済
「柏崎刈羽原子力発電所 7 号機原子炉建屋・タービン建屋およびコントロー
ル建屋におけるひび割れ補修報告書」