

## 観測記録に基づく免震住宅の地震応答解析

### － 2011 年 東北地方太平洋沖地震 －

#### 1. はじめに

2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分頃に発生した東北地方太平洋沖地震において防災科学技術研究所強震観測網(K-NET、KiK-net)により観測された強震観測の公開データを用いて、免震住宅の地震応答解析を実施しました。以下にその概要の報告を行います。

#### 2. 観測記録の概要

地震および観測記録の概要を表 1 に示します。また、計測震度 5.5 (震度 6 弱) 以上の観測点の加速度、速度、変位の最大値一覧を表 2 に示します。計測震度は 3 成分の加速度記録から平成 8 年気象庁告示第 4 号に基づいて算定しました。速度波形および変位波形は、加速度記録を数値積分して求めました。

表 1 地震および観測記録の概要

地震名	東北地方太平洋沖地震
地震発生時刻	2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分
地震の規模	マグニチュード 9.0
観測点数 (K-net)	273 観測地点
最大加速度	2700 gal 築館 (MYG004 NS)
最大速度(加速度記録の積分による)	105 kine 築館 (MYG004 NS)
最大変位(同上)	29.7 cm 仙台 (MYG013 NS)

※観測点数は当初 273 地点でしたが、その後追加されて倍以上になっています。

震度 7 は築館の 1 箇所でした。震度 6 強は、日立、銚田、仙台、茂木、塩竈の 5 箇所でした。震度 6 弱は 24 箇所でした。

加速度の最大値は築館の NS 成分で 2700gal でした。加速度が 2000gal を超えたのはこの 1 点だけでした。震度 6 強以上となった 6 箇所では加速度が 1000gal を超えています。

速度の最大値は築館の NS 成分で 105kine でした。2 番目は震度 6 弱の岩沼、次いで仙台と小川で、74～76kine になっています。震度 6 強以上では 60kine 以上になっています。

変位の最大値は仙台の NS 成分で 29.7cm でした。2 番目は震度 6 弱の岩沼で 28.5cm、次いで仙台の EW で 23.4cm になっています。変位に関しては、震度 5 強程度で 20cm を超える箇所がありましたが表には入っていません。これについては、後で考察します。

表 2 震度 6 弱以上の観測点 30 箇所の最大値一覧

観測点 記号	観測点 地名	観測加速度			観測速度			観測変位			計測 震度
		EW	NS	UD	EW	NS	UD	EW	NS	UD	
MYG004	築館	1268	2700	1880	48	105	37	17	21	11	6.6
IBR003	日立	1183	1600	1165	42	66	23	11	10	9	6.4
IBR013	鉾田	1070	1356	811	61	67	25	13	17	6	6.4
MYG013	仙台	985	1514	291	40	74	26	23	30	14	6.3
TCG014	茂木	1207	710	494	63	50	18	10	10	9	6.3
MYG012	塩竈	1974	762	502	61	31	19	20	13	14	6.0
IWT012	北上	454	590	197	31	44	13	8	6	7	5.9
IBR002	高萩	589	527	497	54	39	26	12	11	9	5.9
MYG010	石巻	378	458	330	54	50	18	14	20	13	5.9
MYG015	岩沼	357	411	254	48	76	34	18	29	13	5.9
TCG006	小川	377	376	180	48	74	21	11	21	9	5.9
IBR006	水戸	787	779	426	28	36	12	12	16	6	5.8
FKS001	相馬	552	621	331	43	46	15	15	15	9	5.8
MYG007	豊里	649	569	241	37	34	14	13	11	9	5.8
IBR007	那珂湊	513	544	413	47	32	14	10	11	6	5.8
FKS023	会津若松	421	451	128	41	39	12	10	10	6	5.8
MYG017	角田	352	320	159	42	43	14	12	14	11	5.8
IWT007	釜石	697	631	439	29	25	10	7	8	13	5.7
TCG013	真岡	421	415	299	37	39	13	7	11	8	5.7
MYG011	牡鹿	686	919	254	38	18	15	11	7	20	5.6
MYG002	歌津	658	642	362	25	27	16	9	17	8	5.6
CHB003	白井	464	472	269	28	31	9	19	10	5	5.6
IBR014	土浦	498	385	248	36	27	10	9	10	6	5.6
IBR011	つくば	342	329	156	45	24	11	10	11	6	5.6
MYG003	東和	784	569	303	35	23	15	8	13	9	5.5
FKS019	二本松	405	392	171	28	26	10	8	5	6	5.5
MYG008	北上	291	372	288	42	26	14	15	10	8	5.5
TCG001	黒磯	412	363	155	29	39	15	6	12	5	5.5
IBR010	下妻	407	309	205	28	38	11	9	13	5	5.5
IBR001	大子	398	302	266	32	26	9	8	10	7	5.5

全データ 273 地点の計測震度と加速度、速度、変位のグラフを図 1、2、3 に示します。  
 図から計測震度 6.0 (震度 6 強)以上では、加速度は 1000gal 以上、速度は 60kine 以上になっていることが確認できます。

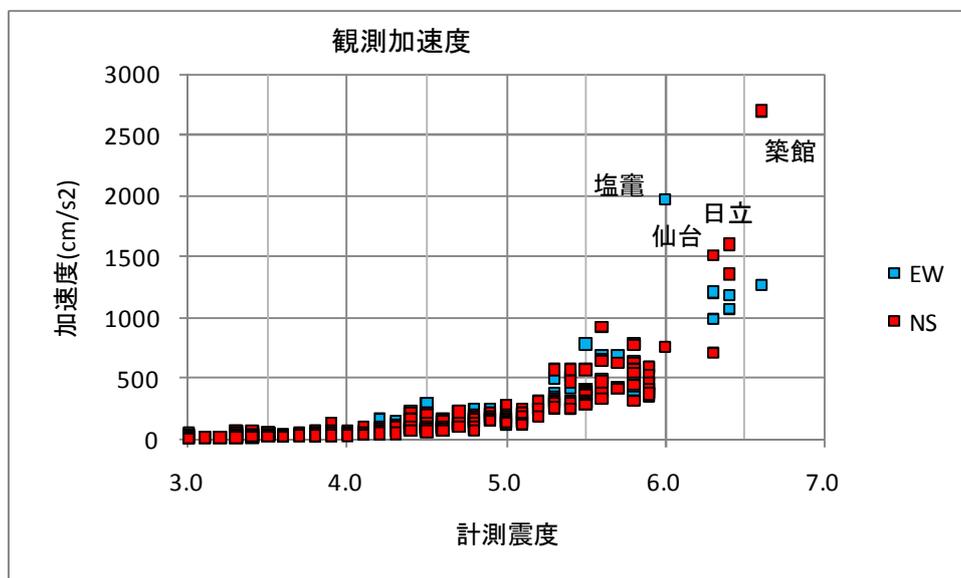


図 1 計測震度と観測最大加速度

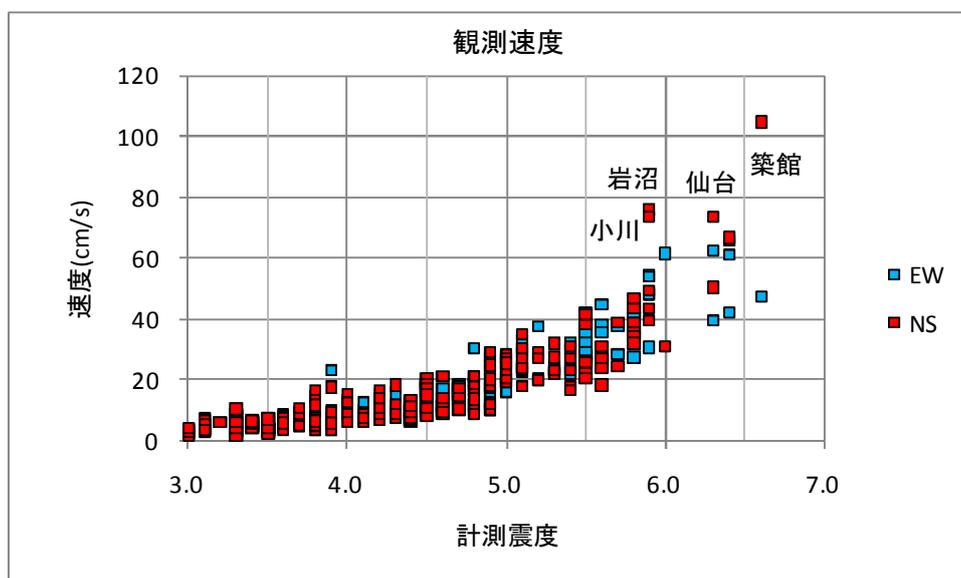


図 2 計測震度と観測最大速度

阪神大震災で観測された神戸海洋気象台の記録は、最大加速度 818gal、最大速度 91kine、最大変位 20cm でした。今回の地震では、計測震度 5.0 前後で変位が 20cm を超えるケースが目立ちます(図 3 参照)。この理由については、現時点ではよく分かっていませんが、以下のような要因が関係していると推察します。計測震度 5.0 といった地点は震源から離れてい

ると考えられます。変位が大きいということは、長周期成分が関与していると予想されます。今回の地震のマグニチュードは9.0ときわめて大きいことが特長です。加速度波形には2つのピークが認められ、2段階に渡って断層がずれたと考えられます(図4、5参照)。

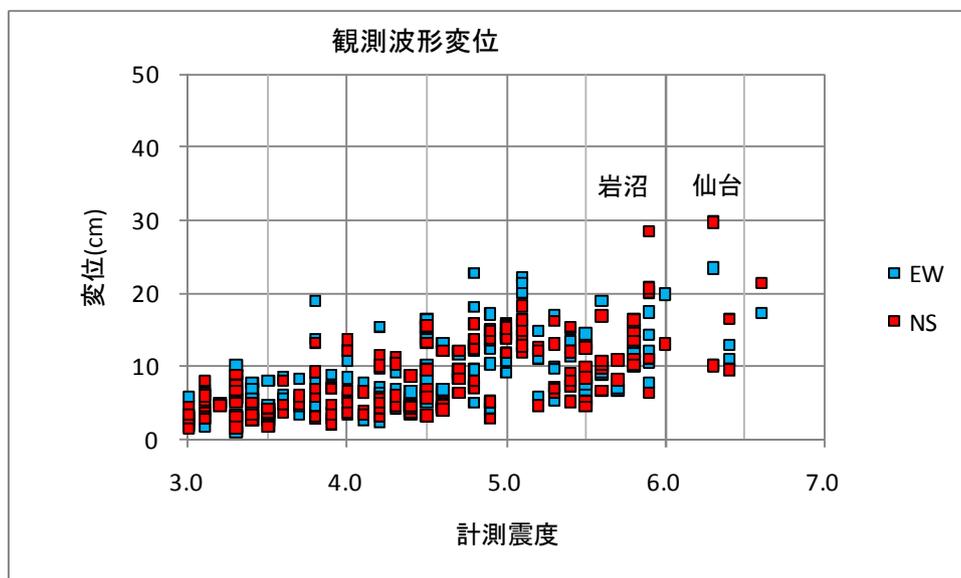


図3 計測震度と観測最大変位

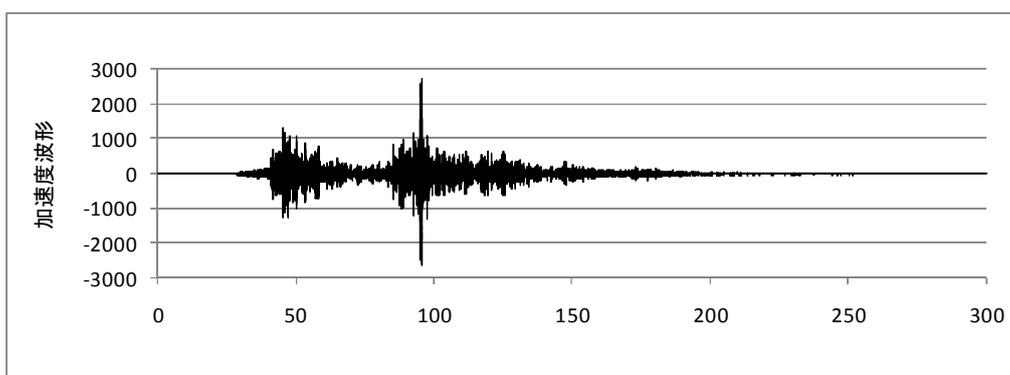


図4 加速度波形(築館 NS、最大値 2700gal)

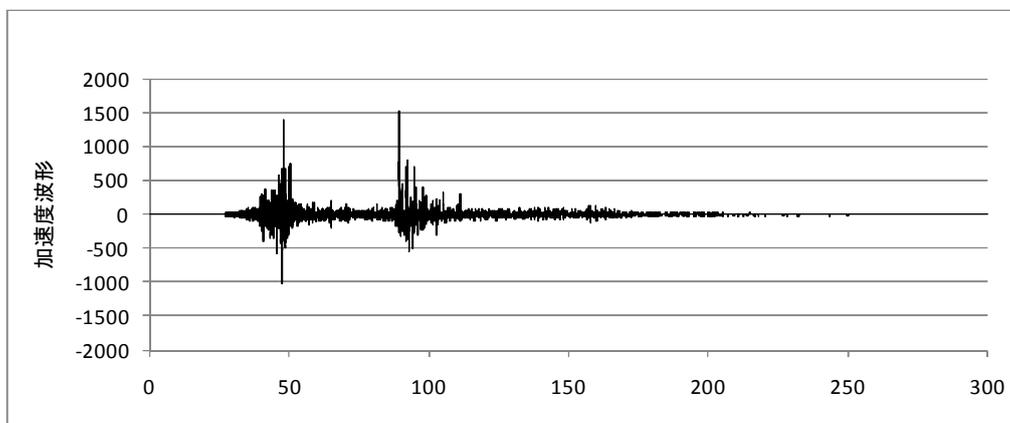


図5 加速度波形(仙台 NS、最大値 1515gal)

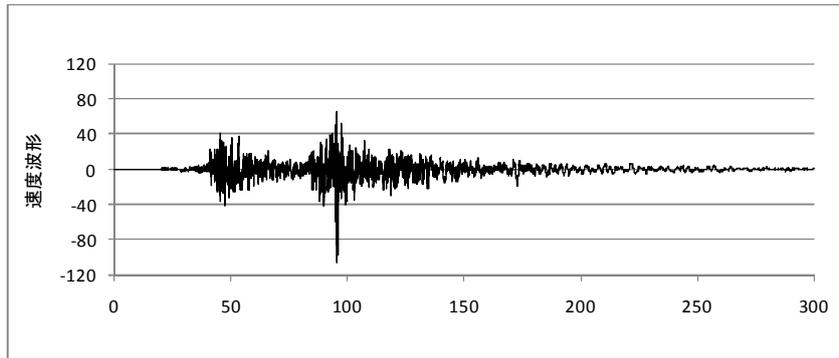


図6 速度波形(築館 NS、最大値 105kine)

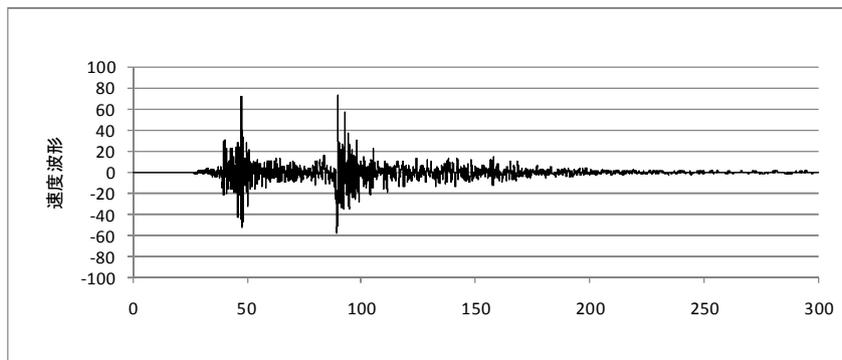


図7 速度波形(仙台 NS、最大値 73.6 kine)

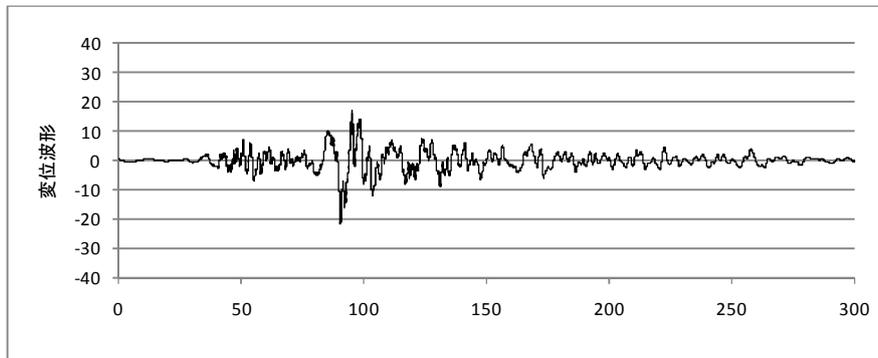


図8 変位波形(築館 NS、最大値 105kine)

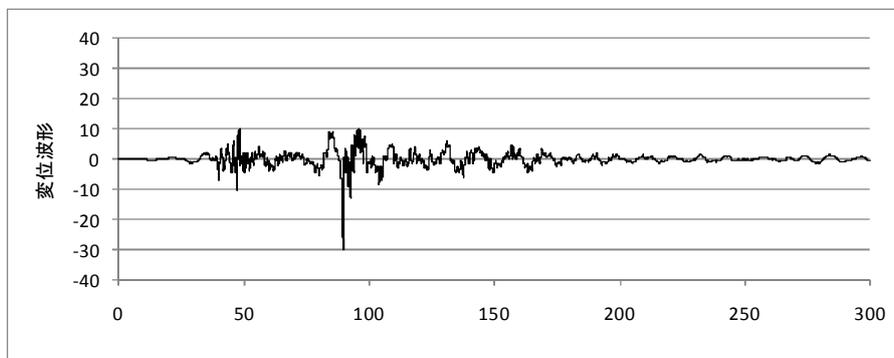


図9 変位波形(仙台 NS、最大値 29.7cm)

### 3. 免震住宅応答解析

東北太平洋沖地震で観測された 273 箇所地震観測記録を入力として免震住宅の応答解析を行いました。解析条件は、免震周期(接線周期、ゴム周期)を 4 秒、すべり支承の摩擦係数を 0.13 としました。

表 3 応答解析条件

免震周期	4 秒
摩擦係数	0.13
解析方法	線形加速度法
解析時間間隔	0.0002 秒
解析モデル	1 質点

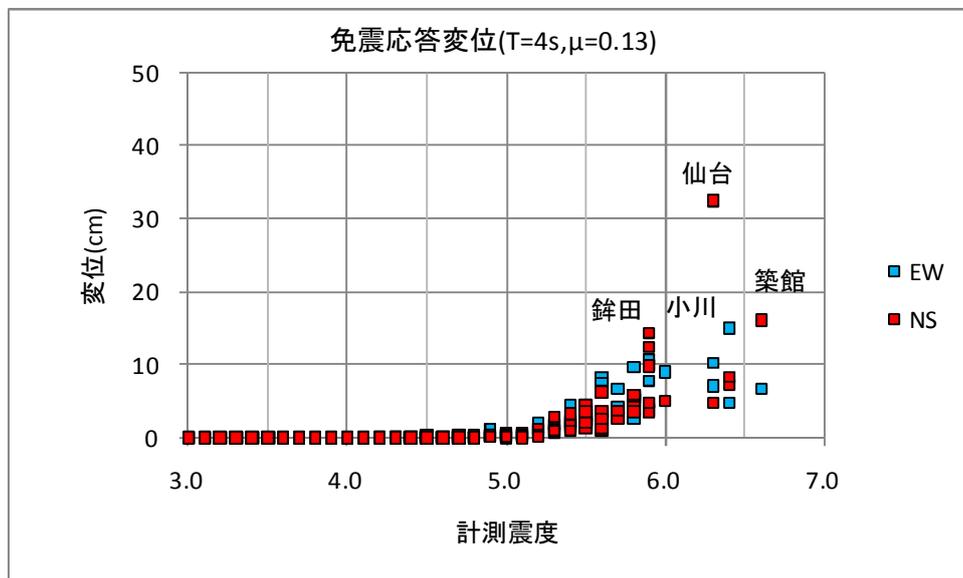


図 10 免震建物の応答変位と計測震度

免震建物の最大変位は、仙台の NS 成分で 32.4cm となりました。次は築館の NS で 16.1cm でした。最大変位が 10cm を超えたものは 7 波形でした。

築館の免震変位は、過去の神戸波(JMA KOBE NS)や小千谷波(K-Net OJIYA EW)に比べると最大加速度が 2700gal と大きかった割に免震変位の 16.1cm は小さいと言えます。仙台の観測波は計測震度 6.3 で神戸の観測波の計測震度 6.4 よりやや低いが、免震変位は 32.4cm で計測震度 6.7 の小千谷波と同等で、神戸波の 1.7 倍になっています。

表 4 過去の地震観測波と免震応答

観測地震波	加速度	速度	変位	計測震度	免震変位
JMA KOBE NS	818	91	20	6.4	18.7
K-Net OJIYA EW	1314	128	33	6.7	32.5

免震建物の最大応答変位は、地盤の最大変位にほぼ比例します。地盤の最大変位は、計測震度 5 前後で 20cm 程度になるケースがありました(図 3 参照)。しかし、これは特殊なケ

ースと言えます。地盤の変位が 20cm と云うのは阪神大震災の神戸海洋気象台の観測波に相当します(表 4 参照)。つまり変位だけ見ると震度 6 強相当します。これは長周期成分が大きいためと推定されます。以前からこの現象が懸念されていました。すなわち巨大な地震が起きた場合には、長周期成分が大きくなり、長周期成分は減衰が少ないため遠く離れた地点で超高層建物や免震建物、石油タンクなどの長周期構造物に被害が出るのではないかと云う問題です。今回の地震で首都圏の石油タンクで火災が起きました。また、超高層建物も相当激しく揺れたと聞いています。

都内でも浦安市などで地盤の液状化で大きな被害が出ていますが、これも長周期成分が関与していると考えられます。

免震建物は長周期ですが減衰が大きく設定されているので問題はないと考えられていました。計算によるシミュレーションの結果ですが、計測震度 5.0 前後では免震建物の最大変位は 5cm 以下に納まっている。

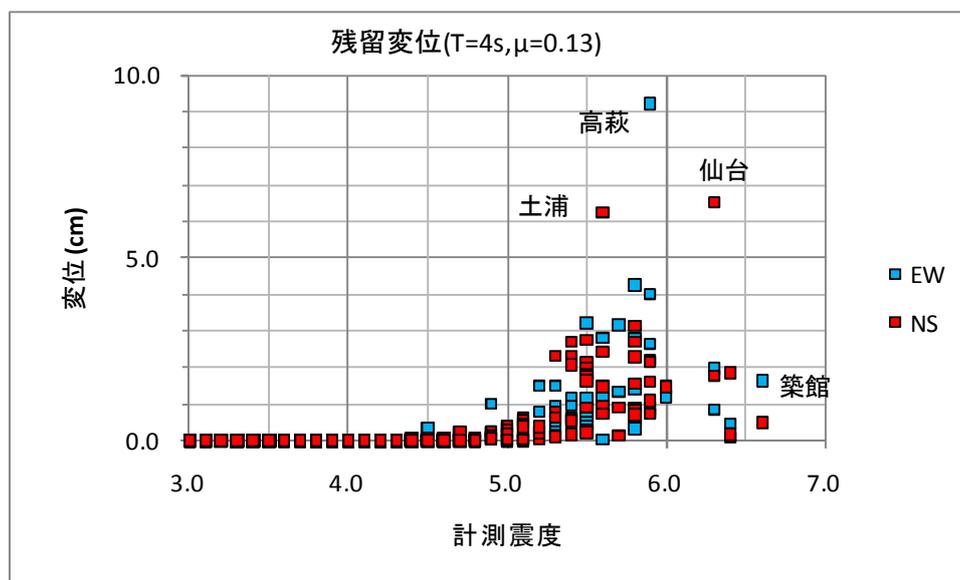


図 11 免震の残留変位と計測震度

免震した場合の残留変位は、高萩が最大で 9.2cm、仙台、土浦でそれぞれ 6.5cm、6.2cm になりました(表 4 参照)。震度 7 だった築館では 1.6cm と問題ない程度に小さくなっています。ちなみに築館の最大変位は 16.1cm でした。震度 6 強以上では仙台 NS 以外は 2.0cm 以下に納まっています。高萩は震度 6 弱で免震の最大変位は 10.8cm で残留変位が 9.2cm になっています。また、土浦も震度 6 弱で免震の最大変位は 6.3cm で残留変位が 6.2cm になっています。これらは特殊なケースと考えられます。現時点では原因を特定できませんが、地盤が塑性化することにより、地盤に残留変形(塑性変形)が起きた可能性があると考えています。

表4 免震建物の応答解析結果一覧

観測点	観測加速度		観測速度		計測 震度	免震加速度		免震変位		残留変位	
	EW	NS	EW	NS		EW	NS	EW	NS	EW	NS
築館	1268	2700	47.5	104.7	6.6	144	167	6.7	16.1	1.6	0.5
日立	1183	1600	42.1	65.9	6.4	139	145	4.8	7.1	0.4	0.2
鉾田	1070	1356	61.3	66.6	6.4	164	148	14.9	8.2	0.1	1.9
仙台	985	1514	39.7	73.6	6.3	145	207	7.0	32.4	2.0	6.5
茂木	1207	710	62.5	50.3	6.3	152	139	10.1	4.7	0.8	1.8
塩竈	1974	762	61.4	30.9	6.0	149	140	9.0	4.9	1.2	1.5
北上	454	590	30.6	43.5	5.9	137	136	3.7	3.5	0.9	0.7
高萩	589	527	54.2	39.4	5.9	154	139	10.8	4.7	9.2	1.1
石巻	378	458	53.8	49.5	5.9	152	152	9.9	9.8	2.6	2.2
岩沼	357	411	48.4	76.0	5.9	146	158	7.7	12.4	0.7	2.1
小川	377	376	48.3	73.8	5.9	139	163	4.8	14.3	4.0	1.6
水戸	787	779	27.5	35.7	5.8	134	142	2.5	5.8	0.6	2.3
相馬	552	621	42.5	46.4	5.8	137	140	4.1	5.1	2.8	0.8
豊里	649	569	36.7	34.1	5.8	140	136	5.2	3.7	4.3	3.1
那珂湊	513	544	46.8	32.0	5.8	140	136	5.2	3.6	0.3	1.5
会津若松	421	451	40.5	38.8	5.8	151	141	9.7	5.5	1.4	2.7
角田	352	320	42.4	43.3	5.8	141	142	5.7	5.8	0.9	0.7
釜石	697	631	28.6	24.6	5.7	137	134	4.0	2.7	1.3	0.1
真岡	421	415	37.4	39.0	5.7	144	136	6.6	3.7	3.2	0.9
牡鹿	686	919	37.8	18.2	5.6	147	130	8.1	0.9	1.1	0.7
歌津	658	642	24.7	27.3	5.6	133	136	2.4	3.6	0.0	1.5
白井	464	472	27.7	31.2	5.6	136	134	3.3	2.6	0.8	2.4
土浦	498	385	35.5	27.3	5.6	135	143	3.1	6.3	0.7	6.2
つくば	342	329	44.9	23.7	5.6	146	130	7.4	1.2	2.8	1.0
東和	784	569	34.7	22.6	5.5	137	132	4.0	1.7	1.1	0.2
二本松	405	392	28.0	25.6	5.5	135	133	3.1	2.3	0.4	1.8
北上	291	372	42.1	26.3	5.5	138	130	4.4	1.3	3.2	0.9
黒磯	412	363	28.6	38.6	5.5	131	138	1.6	4.4	0.6	2.8
下妻	407	309	27.9	38.1	5.5	134	136	2.6	3.6	0.8	2.0
大子	398	302	32.3	25.8	5.5	135	135	2.9	2.9	1.7	2.1
石岡	301	287	32.3	41.6	5.5	132	136	2.0	3.5	0.3	1.6
桐生	355	280	28.7	20.6	5.5	133	132	2.3	2.0	0.9	1.8

#### 4. まとめ

東北地方太平洋沖地震において防災科学技術研究所強震観測網(K-NET、KiK-net)により観測された強震観測の公開データを用いて、免震住宅の地震応答解析を実施しました。

その結果をまとめると以下のようになります。

##### 【観測記録の概要】

- ① マグニチュードが 9.0 ときわめて大きい。
- ② 震度 7 は築館の 1 箇所でした。震度 6 強は、日立、鉾田、仙台、茂木、塩竈の 5 箇所でした。ただし、その後新たな観測記録の追加により数の変更の可能性があります。
- ③ 加速度の最大値は築館の NS 成分で 2700gal でした。加速度が 2000gal を超えたのは 1 点だけでした。震度 6 強以上では加速度が 1000gal を超えています。
- ④ 速度の最大値は築館の NS 成分で 105kine でした。2 番目は震度 6 弱の岩沼、次いで仙台と小川で 74~76kine です。震度 6 強以上では 60kine 以上になっています。
- ⑤ 変位の最大値は仙台の NS 成分で 29.7cm でした。2 番目は震度 6 弱の岩沼で 28.5cm、次いで仙台の EW で 23.4cm になっています。
- ⑥ 変位に関しては、震度 5 弱~5 強で 20cm を超える箇所がありました。

##### 【免震建物の応答解析】

- ⑦ 免震建物の最大変位は、仙台の NS 成分で 32.4cm となりました。次は築館の NS で 16.1cm でした。最大変位が 10cm を超えたものは 7 波形でした。
- ⑧ 仙台の観測波は計測震度 6.3 で神戸(JMA KOBE NS)の観測波の計測震度 6.4 よりやや低い。しかし、免震変位は 32.4cm で神戸波の 1.7 倍で計測震度 6.7 の小千谷(K-Net OJIYA EW)と同等になっています。
- ⑨ 築館の免震変位は、過去の神戸や小千谷に比べると最大加速度が 2700gal と大きい割に免震変位の 16.1cm は小さいと言えます。

これまで、免震建物の設計は神戸波(JMA KOBE NS 818gal)を標準の入力地震動として行われてきました。その後、新潟県中越地震では、小千谷(K-NET OJIYA 1314gal)で、神戸波の 1.5 倍以上の地震波が観測されました。こうした状況から免震ハウス(株)では、小千谷波を標準に設計をしてきました。そして、すべり支承の摩擦係数は 0.13、最大許容変位は 35cm にしています。

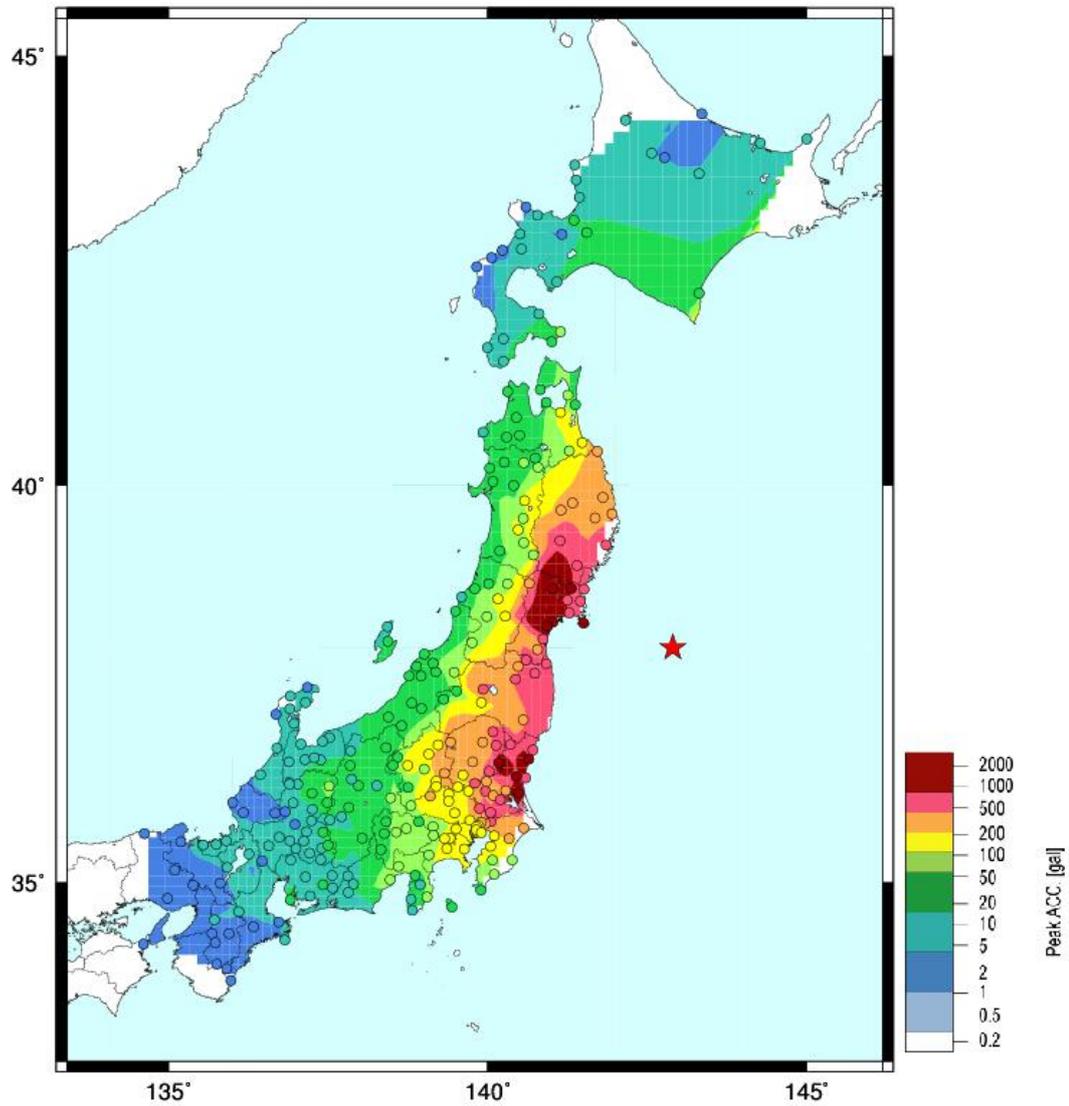
今回の地震では最大加速度 2700gal、最大速度 105kine、最大変位 29.7cm が観測されました。最大加速度は小千谷波を上回っていますが、最大速度、最大加速度は下回っています。また、シミュレーションの結果では、免震建物の最大変位は、仙台で 32.4cm と小千谷波とほぼ同じになりました。

小千谷波を免震建物の設計標準波としてきた、免震ハウス(株)の考えが正しかったことが実証されたと考えています。

【参考】 観測地震波の最大加速度コンター図

防災科学技術研究所強震観測網(K-NET)で公開されている図をそのまま掲載しています。

Peak Acceleration Contour Map



**K-NET NIED**