

観測記録に基づく免震住宅の地震応答解析

－ 2016 年 熊本地震 －

1. はじめに

2016 年 4 月 16 日 1 時 25 分に発生した熊本地震は、マグニチュード 7.3、最大震度 7 と発表されています。防災科学技術研究所では、強震観測網(K-NET、KiK-net)により観測されたデータを公開データとしています。この観測地震動を用いて、免震住宅の地震応答解析を実施しました。以下にその概要を報告します。

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	平成 28 年 熊本地震
地震発生時刻	2016 年 4 月 16 日 1 時 25 分
地震の規模	マグニチュード 7.0
最大加速度	1155 gal 益城 (KMMH16 EW)
最大速度(加速度記録の積分による)	129 cm/s 益城 (KMMH16 EW)
最大変位(同上)	57.3 cm 益城 (KMMH16 EW)

震度 7 は益城の 1 箇所でした。私の計算では計測震度 6.4 で震度 6 強でしたが、気象庁等の発表では震度 7(計測震度 6.7)でした。観測データの扱い方によって±0.3 程度の計算誤差がありそうです。

震度 6 強は、熊本、宇土、湯布院、菊池の 4 箇所でした。震度 6 弱は 7 箇所でした。

加速度の最大値は益城の EW 成分で 1155gal でした。加速度が 1000gal を超えたのはこの 1 箇所だけでした。震度 6 強となった 4 箇所では加速度が 718～828gal になっています。

速度の最大値は益城の EW 成分で 129cm/s でした。震度 6 強の 4 箇所では 81～92cm/s になっています。

変位の最大値は益城の EW 成分で 57.3cm でした。震度 6 強の 4 箇所では 19~35cm でした。特筆すべきは阿蘇一宮で震度 6 弱でしたが変位は 47cm で益城に次いで 2 番目に大きな変位でした。

表 2 震度 6 弱以上の観測点 12 箇所の最大値一覧

観測点 記号	観測点 地名	観測加速度 (gal)			計算速度 (cm/s)			計算変位 (cm)			計算 震度
		NS	EW	UD	NS	EW	UD	NS	EW	UD	
KMM004	阿蘇一宮	261	347	269	74	81	22	43	47	17	5.5
KMM005	大津	525	482	397	55	55	52	27	34	37	5.7
KMM006	熊本	828	616	535	68	92	33	27	35	16	6.0
KMM008	宇土	652	771	422	66	85	14	19	19	8	6.2
KMM009	矢部	776	640	187	34	26	13	19	11	6	5.7
KMM011	砥用	598	603	255	29	29	8	8	5	3	5.6
OIT009	湯布院	527	718	475	52	82	11	19	20	5	6.0
KMMH02	小国	304	660	286	36	39	15	19	21	9	5.5
KMMH03	菊池	786	227	403	81	21	16	27	10	10	6.1
KMMH14	豊野	457	402	539	61	42	25	14	10	5	5.7
KMMH16	益城	651	1155	873	86	129	50	24	57	24	6.4
OITH11	九重	560	518	272	23	19	8	9	12	4	5.5

表 3 気象庁震度階と計測震度(計算震度)の関係

震度階級	計測震度	震度階級	計測震度
0	0.5 未満	5 弱	4.5 以上 5.0 未満
1	0.5 以上 1.5 未満	5 強	5.0 以上 5.5 未満
2	1.5 以上 2.5 未満	6 弱	5.5 以上 6.0 未満
3	2.5 以上 3.5 未満	6 強	6.0 以上 6.5 未満
4	3.5 以上 4.5 未満	7	6.5 以上

東日本大震災(東北太平洋沖地震)では、最大加速度は築館で 2700gal、最大速度は同じく築館で 105cm/s、最大変位は仙台で 29.7cm でした。

阪神大震災(兵庫県南部地震)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 91cm/s、最大変位 20cm でした。

東北太平洋沖地震で観測された最大加速度は、熊本地震の 2.3 倍ですが、変位は今回の方が 1.9 倍大きくなっています。

兵庫県南部地震で観測された地震動と比較すると今回の熊本地震は、加速度で 1.3 倍、変位で 2.9 になります。

3. 免震建物の応答計算

3.1 応答加速度

熊本地震の特徴は、地震断層の直上で観測されていて変位が大きいことが挙げられます。このことが免震建物にどの様に影響するか免震建物応答シミュレーションしてみました(図 1,2 参照)。

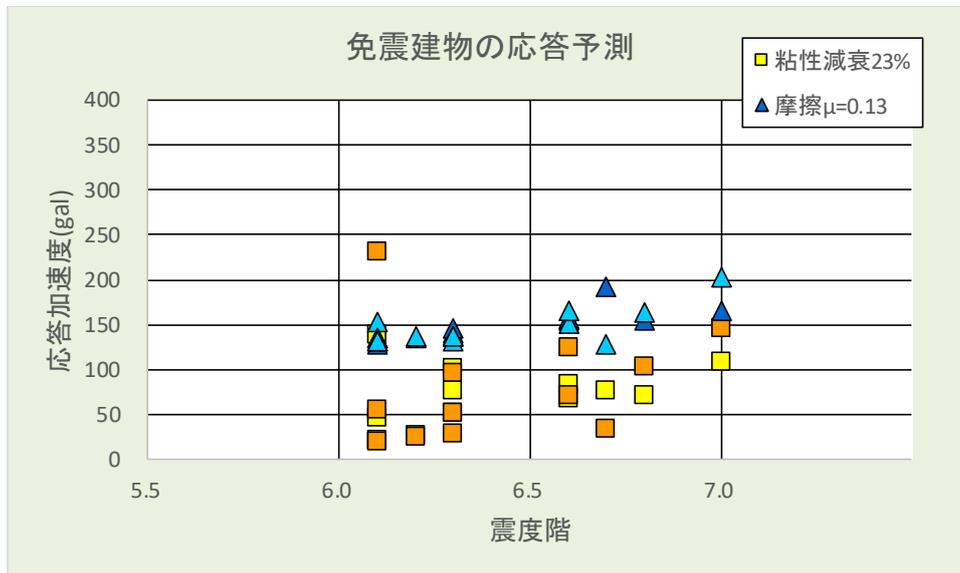


図 1 震度階級と免震建物の最大加速度

凡例：▲印 免震 ARMOR、摩擦係数 μ を 0.13 として計算、免震周期 4 秒

■印 オイルダンパーを想定、粘性減衰定数を 0.23 として計算、免震周期 4 秒

※ 東西方向と南北方向をそれぞれ計算している表示している。

免震 ARMOR では、震度 6 弱では応答加速度が 150gal 以下に、震度 6 強以上でも 200gal 以下になっています。

オイルダンパーを採用した他社の免震装置では震度 6 弱では応答加速度が 100gal 以下に、震度 6 強以上でも 150gal 以下になっています。しかし、震度 6 弱で 1 箇所だけ 230gal になっている所があります。

3.2 応答変位

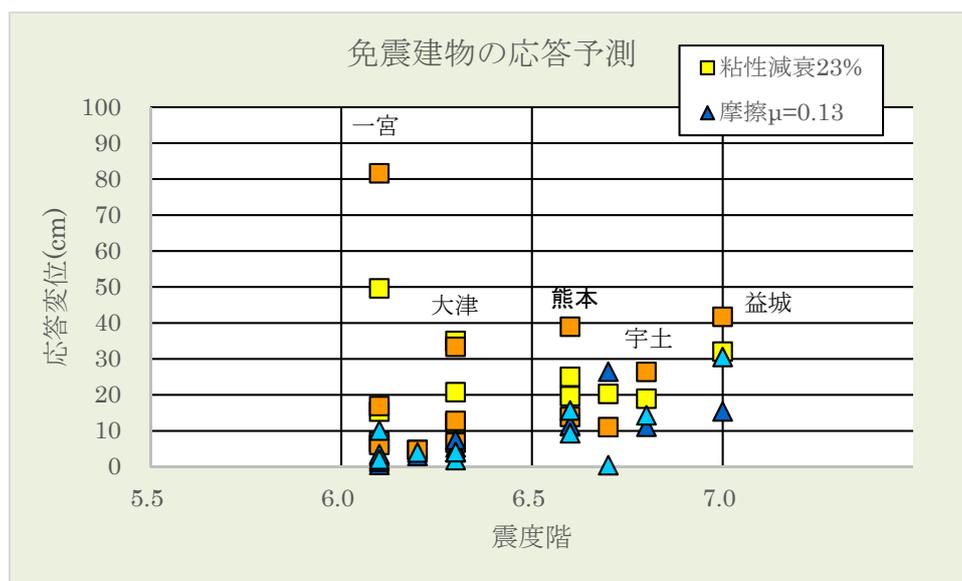


図 2 震度階級と免震建物の最大変位

免震 ARMOR では、震度 6 弱では応答変位が 10cm 以下に、震度 6 強以上でも 30cm 以下になっています。

免震 ARMOR は、最大変位は 40cm まで可能ですが、通常の設計では 35cm 程度に設定しています。従って、今回の熊本地震でもストロークアウト(変位が設計限界を超えて衝突すること)することなく十分な免震効果が得られるといえます。

オイルダンパーは、ストロークが長くなると製造コストが割り増しになる為にオイルダンパーを採用した他社の免震装置では、一般的に最大変位は 30cm に設定している所が多いようです。

オイルダンパーを採用した他社の免震装置では震度 6 弱から 30cm を超えています。震度 7 の益城で 42cm、熊本で 39cm、大津で 35cm、阿蘇一宮では 82cm になっています。

阿蘇一宮は震度 6 弱ですが震度 5 強を少し超えた程度です。それにも拘わらず 82cm の応答変位はやや特異です。何か原因があると思いますので後で詳しく調べてみます。

ちなみに免震 ARMOR の阿蘇一宮の変位は 10cm で震度 5 強を少し超えた程度にしては少し大きい変位かなと言う程度です。

地震動の変位が大きいと云うことの影響は、免震建物の応答変位が大きくなると云う影響をもたらします。免震建物だけでなく超高層ビルでも同様です。

「もし益城町に超高層ビルが建てられていたら倒壊しただろう」と言われています。

4. まとめ

2016 年熊本地震において防災科学技術研究所強震観測網(K-NET、KnK-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 地震マグニチュードは 7.0 とき大きく、直下型の地震であった。
- ② 震度 7 は益城の 1 ヶ所でした。震度 6 強は、熊本、宇土、湯布院、菊池の 4 箇所でした。震度 6 弱は 7 箇所でした。(これらは観測波形が入手できた地点の震度階です)
- ③ 加速度の最大値は益城の EW 成分で 1155gal でした。加速度が 1000gal を超えたのは 1 地点だけでした。

速度の最大値は益城の EW 成分で 129cm/s でした。2 番目は熊本で 92cm/s でした。震度 6 強の 4 箇所では 81~92cm/s なっています。

- ④ 変位の最大値は益城の EW 成分で 57.3cm、2 番目は震度 6 弱の阿蘇一宮で 47.1cm でした。3 番目は震度 6 強の熊本で 35.4cm でした。

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 神戸 NS	818	91	20	6.4	18.7
K-Net 小千谷 EW	1314	128	33	6.7	32.5
築館 NS	2700	105	21	6.6	16.1
仙台 NS	1514	74	30	6.3	32.4
益城 EW	1155	129	57	6.4	30.6

【免震建物の応答解析】

- ⑤ 免震 ARMOR の免震モデルは周期 4 秒、摩擦係数 μ を 0.13 として計算しました。
- ⑥ オイルダンパーを想定した他社の免震モデルは周期 4 秒、粘性減衰定数 h を 0.23 として計算しました。
- ⑦ 免震建物の最大加速度は、免震 ARMOR の場合には震度 6 弱では 150gal 以下になりました。震度 6 強以上でも 200gal 以下になりました。
- ⑧ オイルダンパーを想定した免震モデルでは震度 6 弱では応答加速度が 100gal 以下に、震度 6 強以上でも 150gal 以下になりました。しかし、震度 6 弱で 1 箇所だけ 230gal になっている所があります。
- ⑨ 免震建物の最大変位は、免震 ARMOR では震度 6 弱では 10cm 以下になりました。震度 6 強以上でも 30cm 以下になりました。
- ⑩ オイルダンパーを想定した免震モデルでは震度 6 弱から 30cm を超えています。震度 7 の益城で 42cm、熊本で 39cm、大津で 35cm、阿蘇一宮では 82cm になりました。

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。

東日本大震災では最大加速度 2700gal、最大速度 105cm/s、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、最大変位は下回っています。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。

そして今回の熊本地震では、最大加速度 1155gal、最大速度 129cm/s、最大変位 57.3cm が観測されました。これまでにない大きな変位が観測されましたが免震 ARMOR の最大変位は 30.6cm で小千谷、仙台と同程度でした。

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。

【最後に】

私の家内の実家は熊本県宇土市にあります。3 年前に両親の介護のために 1 階をリフォームしました。風呂場やトイレを新たに設けたため柱や壁が多くなり、その為か今回の地震では木造の古い家でしたが倒壊はしませんでした。屋根瓦が一部壊れた程度で大きな被害はありませんでした。

しかし、屋根瓦の修理は依頼してありますが、1 年半たった今でも修理の順番が回って来ません。

【時刻歴波形】

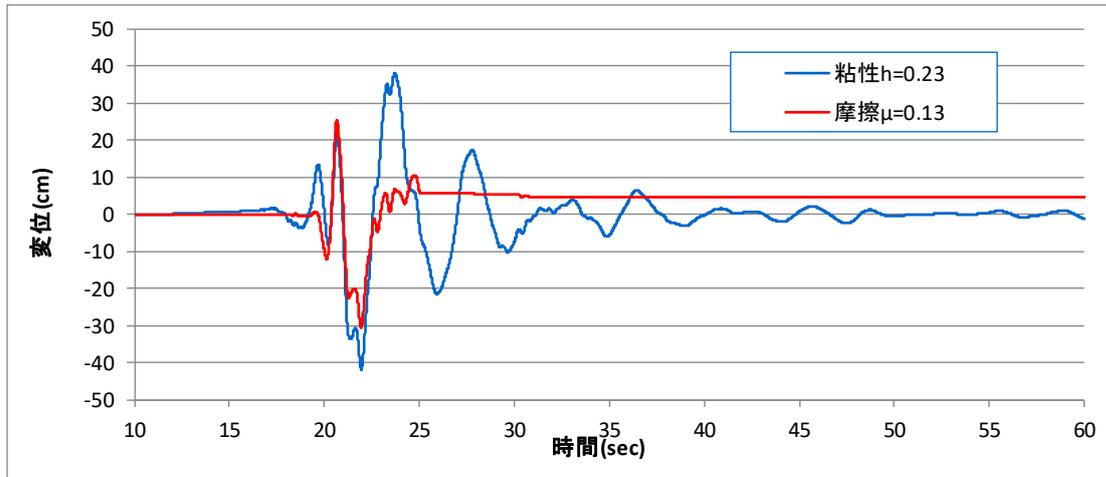


図1 免震 ARMOR とオイルダンパー応答変位の比較(益城 EW)

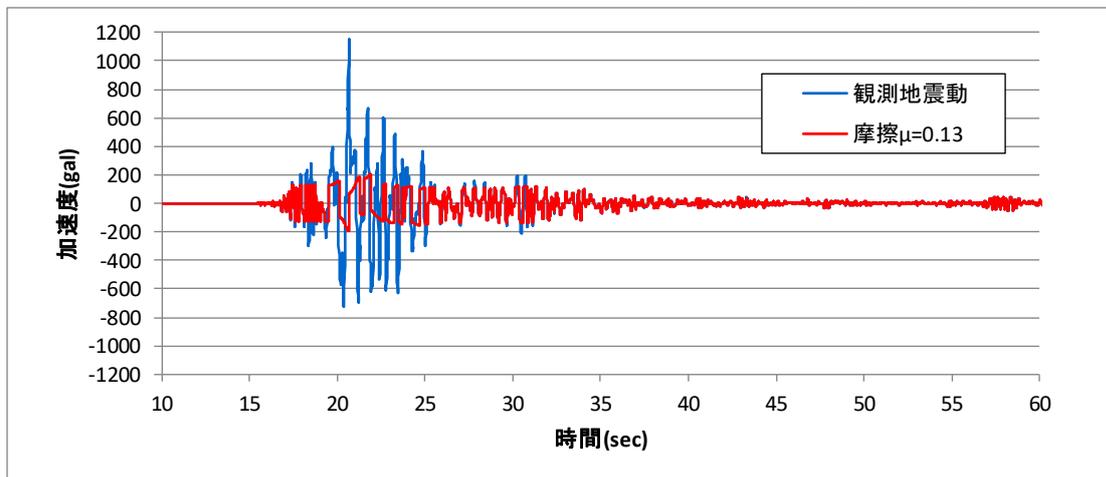


図2 免震 ARMOR の応答加速度(益城 EW)

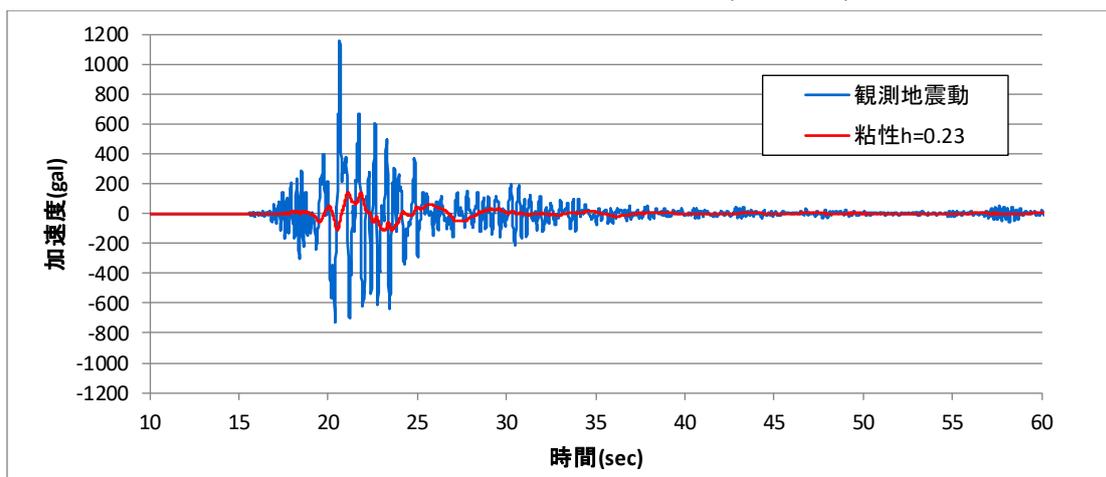


図3 オイルダンパーの応答加速度(益城 EW)

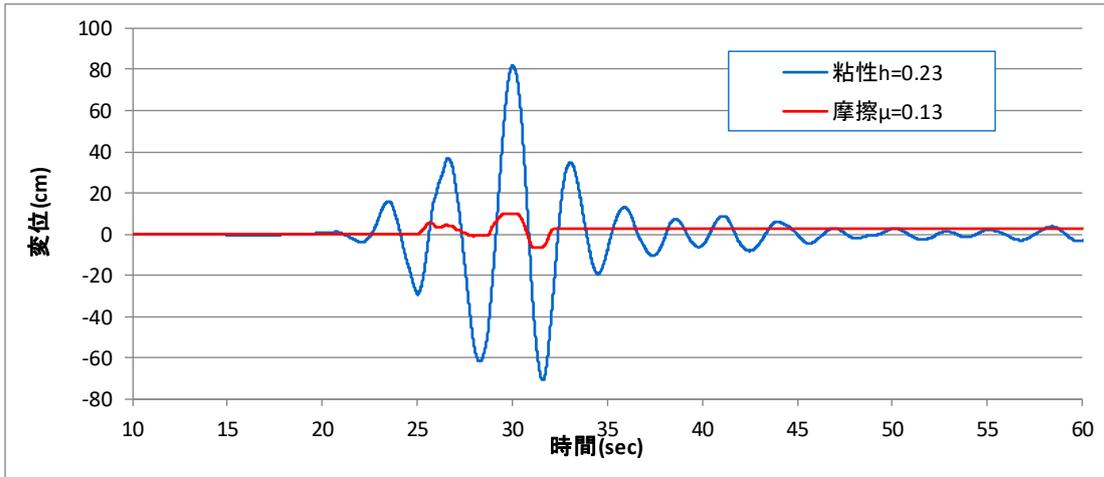


図4 免震 ARMOR とオイルダンパー応答変位の比較(阿蘇一宮 EW)

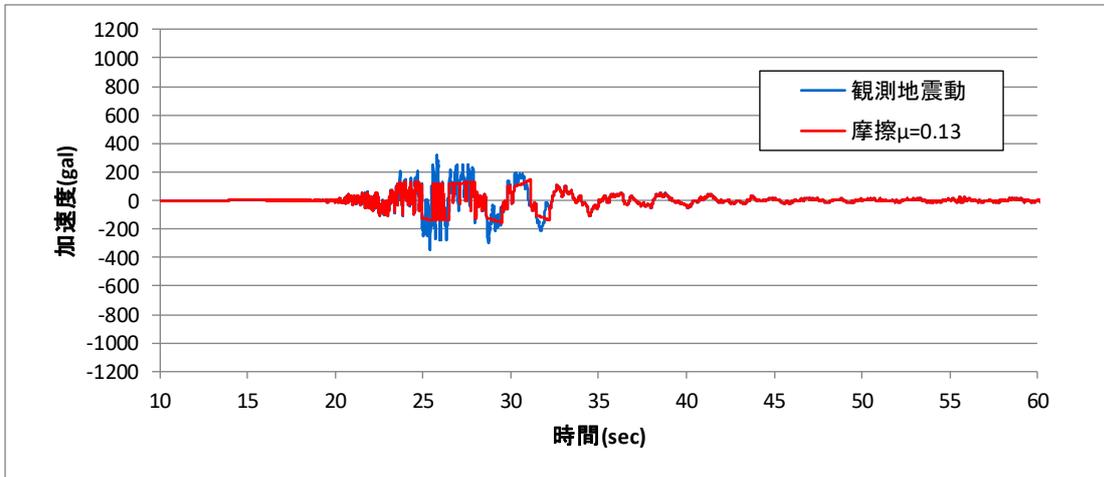


図5 免震 ARMOR の応答加速度(阿蘇一宮 EW)

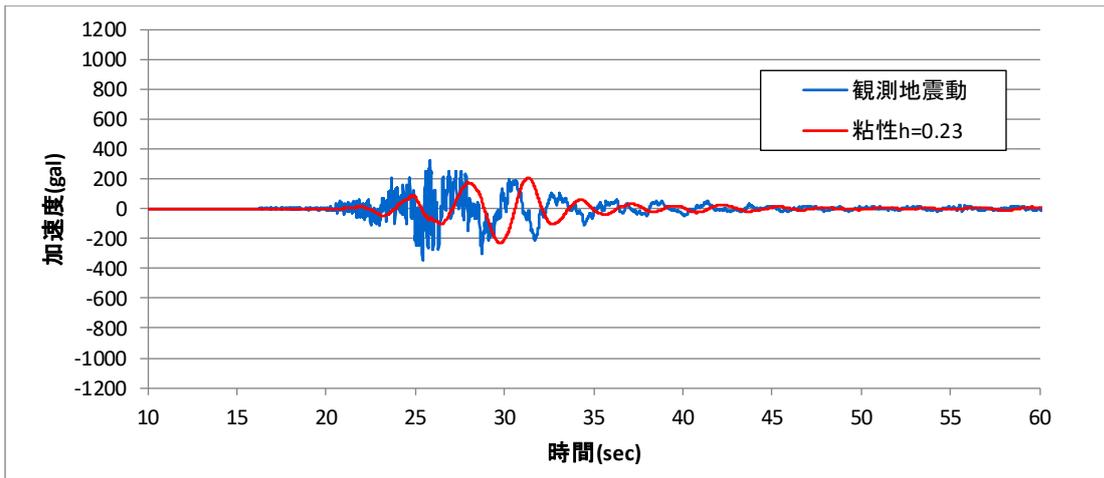


図6 オイルダンパーの応答加速度(阿蘇一宮 EW)