

K-Net 強震記録を活用した高層建物の即時地震応答評価に関する研究

DB13026 板山 諒

1. はじめに

私たちの住む日本は、世界的に見てもまれな地震大国である。東日本大震災などの長周期地震動による大規模な被害がたびたび起こっている。東日本大震災発生時、東京では、地震による直接的な被害はあまりでなかったもののターミナル駅には膨大な帰宅困難者があふれかえり交通が麻痺するなどの問題が多発した。これを受けて、地震発生時に屋外に避難するか、屋内に留まるか被災者は判断する必要性が近年高まっている。

そういった中で、超高層建築などの大規模な建築物では、即座に被害度を判定するシステムなどの導入が進められているが、設置コストや維持コストの観点からマンションや中規模の建物への導入は進んでいない。

本研究では、事前に得られている建物の簡易情報をもとに応答スペクトル法を用いて建物の最大応答を導き、観測記録と比較し応答スペクトル法の妥当性を検討する。また、K-Net(防災科学技術研究所)などから得られる強震データを活用し、近隣の高層建物の応答を導くことができないか検討する。

2. 応答スペクトル法について

応答スペクトル法とは各モードの応答を重ね合わせて最大応答値を簡易的に求める手法である。まず、応答スペクトル法を用いるあたり、推定式を使い各モードの固有周期、減衰定数、刺激関数、一階で観測された各応答スペクトルを用意した。各モードの最大値の2乗を足し合わせたものを平方化することで応答の最大値を導くことができ、本研究ではこれを用いた結果を観測記録と比較した。

・加速度

$$|\ddot{x}_i(t)|_{\max} = \sqrt{|\beta_1 * u_{i1} * S_a(T_1, h_1)|^2 + |\beta_2 * u_{i2} * S_a(T_2, h_2)|^2 + |\beta_3 * u_{i3} * S_a(T_3, h_3)|^2}$$

・速度

$$|\dot{x}_i(t)|_{\max} = \sqrt{|\beta_1 * u_{i1} * S_v(T_1, h_1)|^2 + |\beta_2 * u_{i2} * S_v(T_2, h_2)|^2 + |\beta_3 * u_{i3} * S_v(T_3, h_3)|^2}$$

・変位

$$|x_i(t)|_{\max} = \sqrt{|\beta_1 * u_{i1} * S_d(T_1, h_1)|^2 + |\beta_2 * u_{i2} * S_d(T_2, h_2)|^2 + |\beta_3 * u_{i3} * S_d(T_3, h_3)|^2}$$

$$(\beta_1 * u_{i1}, \beta_2 * u_{i2}, \beta_3 * u_{i3})$$

: 左から i 階の一次、二次、三次の刺激関数の値

$S_d(T_1, h_1), S_d(T_2, h_2), S_d(T_3, h_3), S_a(T_1, h_1), S_a(T_2, h_2), S_a(T_3, h_3)$   
左から一次、二次、三次モード毎の周期、減衰定数における地盤面の変位スペクトルと、加速度スペクトルを表す。刺激関数は5次関数近似によって導かれたものを用いた。以下に示す式は1次、2次、3次モードの刺激関数で、nは最上階を1で基準化した階数でNに階数、Lに対象建物の最上階の数値を代入した。

・刺激関数

$$\begin{aligned} \beta_1 * u_{i1} &= 1.199n + 1.601n^2 - 2.591n^3 + 2.037n^4 - 0.850n^5 \\ \beta_2 * u_{i2} &= 1.631n + 2.078n^2 - 9.918n^3 + 4.916n^4 + 0.699n^5 \\ \beta_3 * u_{i3} &= 0.873n + 10.695n^2 - 57.416n^3 + 80.708n^4 - 34.528n^5 \end{aligned}$$

n=N/L N:階数 L:地上階数(最高階)

・固有周期

S造(鉄骨造)における固有周期(Nは建物の地上階数)

$$\begin{aligned} 1 \text{ 次モード固有周期} : T_1 &= 0.11 \times N \\ 2 \text{ 次モード固有周期} : T_2 &= 1/3 \times T_1 \\ 3 \text{ 次モード固有周期} : T_3 &= 1/5 \times T_1 \end{aligned}$$

RC造における固有周期(Hは建物の軒高(m))

$$\begin{aligned} 1 \text{ 次モード固有周期} : T_1 &= 0.01858 \times H \\ 2 \text{ 次モード固有周期} : T_2 &= 1/3 \times T_1 \\ 3 \text{ 次モード固有周期} : T_3 &= 1/5 \times T_1 \end{aligned}$$

・減衰定数

S造における減衰定数(fは固有振動数)

$$h=0.81 \times f + 1.05$$

RC造(鉄筋コンクリート造)における減衰定数

$$\begin{aligned} (H \text{ は建物の軒高(m)}) \\ h=0.999 \div H \end{aligned}$$

3. 建物概要

本研究では、応答スペクトル法を用いて導かれた値の妥当性を検証するにあたり、観測記録がとれた8つの超高層建築において検討を行った。上から5つの建物が鉄骨造(S造)で下の3つの建物が鉄筋コンクリート造(RC造)である。建物概要について表1に示す。なお、使用した観測波は東北地方太平洋沖地震(3.11)(減衰5%)である。

表 1 建物概要

建物名	周辺のK-Net	長周期地震動階級	構造種別	地上階数	軒高(m)
工学院大学新宿キャンパス(大学棟)	新宿	2	S造	29	143
エステック情報ビル(オフィス棟)	新宿	2	S造	28	130
A	新宿	2	S造	31	121.5
B	新宿	2	S造	30	123.35
C	東雲	2	S造	40	155.79
D	東雲	2	RC造	33	103.8
E	東雲	2	RC造	24	72.55
F	川口	3	RC造	30	96.6

今回、S造は1次、2次、3次モードの減衰定数をそれぞれ導き使用したが、RC造においては、2次、3次モードでの減衰定数を求めるための推定式がないため、1次モードでの値を2次、3次モードに用いた。

4. 観測との比較

応答スペクトル法を用いて求めた結果と東北地方太平洋沖地震発生時の観測記録がとれている8つの超高層建築(S造5棟、RC造3棟)とでそれぞれ比較した。紙面の都合上、大学棟(S造)の観測結果との比較のみとする。図4-1から4-3に私用した各応答スペクトルを示す。

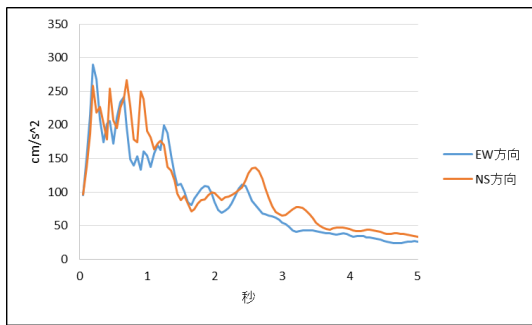


図 4-1 加速度応答スペクトル

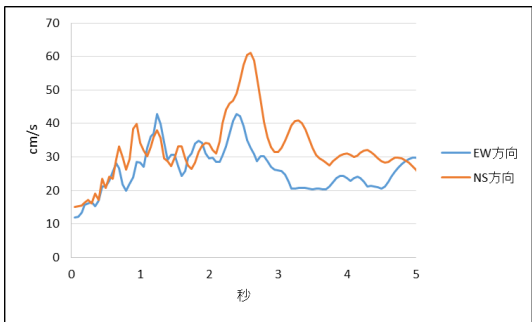


図 4-2 速度応答スペクトル

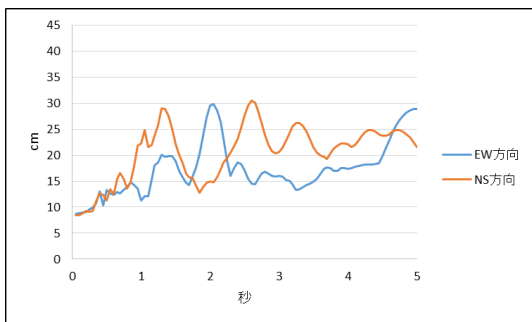


図 4-3 変位応答スペクトル

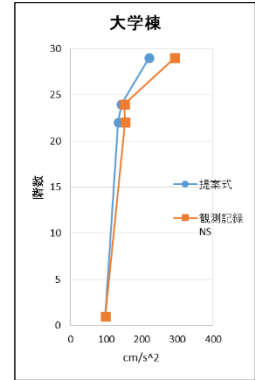
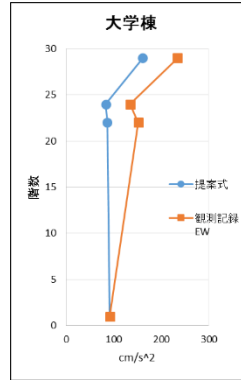


図 4-4 左から EW, NS 加速度比較

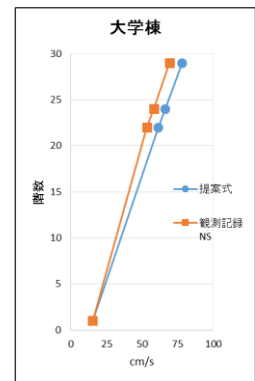
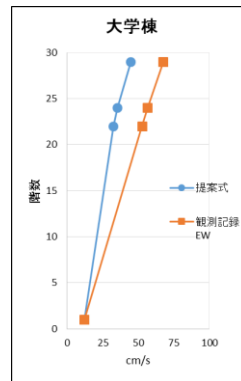


図 4-5 左から EW, NS 速度比較

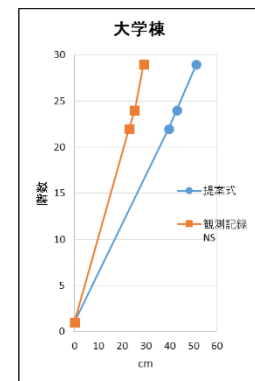
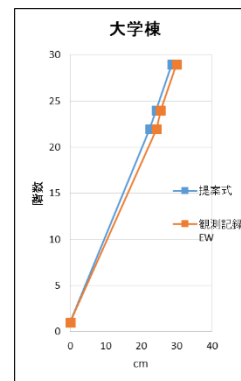


図 4-6 左から EW, NS 変位比較

4.1 観測記録との相関性

対象とした建物8棟のそれぞれの観測階の加速度、速度、変位の最大値と応答スペクトル法を用いて導いた加速度、速度、変位の最大値の相関性を確かめた。縦軸に観測記録、横軸に応答スペクトル法で求めた結果を取る。観測記録と比較して相関係数(r)を求めた。図4-7にS造、図4-8にRC造の結果を示す。

・S造

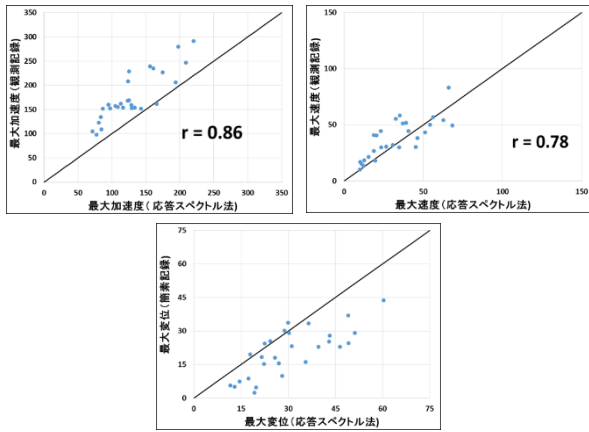


図 4-7 左上から最大加速度、最大速度、最大変位の相関

・RC造

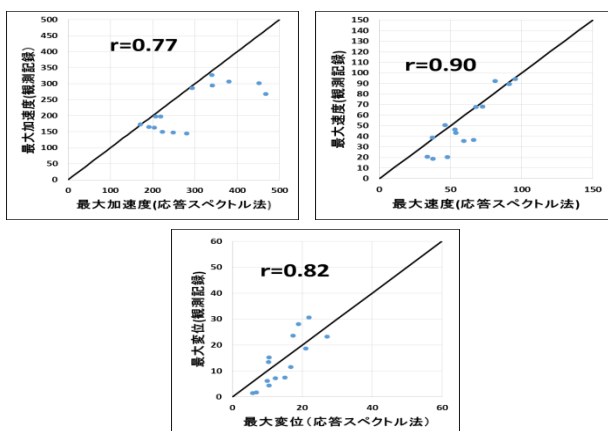


図 4-8 左上から最大加速度、最大速度、最大変位の相関

応答スペクトル法を用いて導いた最大応答と観測記録を比較した。推定式であるため、建物の特性などからバラツキが見られる箇所もあったが、概ね一致している箇所を確認することができた。また、相関図からどの値も高い相関性を持つことが分かった。特にS造では最大加速度、RC造では最大速度において強い相関性を示した。これらの結果により応答スペクトル法の妥当性を確認した。

5. K-Net 強震記録の活用

5.1 表層地盤増幅率について

表層地盤増幅率とは、地表面近くに堆積した地層(表層地盤)の地震時の揺れの大きさを数値化したもので、地震に対する地盤の弱さを示すものである。地震の力を割り増しする係数であり、数値が大きいくほど地盤は弱く揺れは大きくなる。

応答スペクトル法を用いる場合は、建物直下の記録が必要になる。しかし、維持費などの観点から地震計の導入が進んでいない高層マンションなどでは建物直下のデータを用いる

ことができないので近隣の K-Net など観測された記録を用いることができれば理想的である。しかし K-Net の記録は表層地盤上で観測されており、表層地盤の増幅率によって増幅されている。超高層建築は一般的に工学的基盤上に建っているため、K-Net で観測された記録をそのまま使ってしまうと過大評価となってしまふ。K-Net の記録を活用するには、工学的基盤上の数値まで落とさなければならないので増幅率を考慮する必要がある。

5.2 サイト補正

K-Net で観測された記録を用いるために、本研究ではサイト補正に関する経験式を用いた。既往の研究では、表層地盤における J-SHIS(地震ハザードステーション)の最大速度による増幅率で加速度、速度、変位のスペクトルを除したが、本研究では AVS<sub>30</sub>(地下 30mの平均せん断波速度)の値で決まるサイト特性のクラスから応答スペクトルの加速度一定領域(周期 0.1~0.5 秒)の増幅率 Fa と速度一定領域(周期 0.5~1.5 秒)の増幅率 Fv で各応答スペクトルの適用範囲を除して簡易的な補正を行った。サイト特性のクラスについて表 2 にまとめた。K-Net 新宿のサイト特性のクラスは D1 なので回帰係数 a1, a2, a3 を以下の式に代入し求めた。

$$F_a = 10^{a_1 + a_2 \cdot \log(PGA + a_3)} \quad (\text{適用範囲 } 0.1 \sim 0.5 \text{ 秒})$$

$$F_v = 10^{a_1 + a_2 \cdot \log(PGA + a_3)} \quad (\text{適用範囲 } 0.5 \sim 1.5 \text{ 秒})$$

表 2 サイト特性のクラス

サイト特性のクラス	AVS <sub>30</sub>	Fa			Fv		
		a1	a2	a3	a1	a2	a3
A	1500以上	-0.07	0	0	-0.12	0	0
B	760~1500	0	0	0	0	0	0
C1	460~760	0.174	0	0	0.236	0	0
C2	360~460	1.019	-0.34	199.9	0.288	0	0
D1	250~360	1.146	-0.37	132.6	0.362	0	0
D2	180~250	1.421	-0.5	79.6	0.475	-0.01	10.8
E	180以下	1.981	-0.73	69.5	0.923	-0.18	160.6

5.3 結果比較

結果を比較するにあたり工学院大学新宿キャンパス(大学棟)を対象にした。大学とから一番近い K-Net 新宿で観測した東北地方太平洋沖地震(3.11)(減衰 5%)の波形を利用した。

過去の研究で用いられた表層地盤における最大速度の増幅率を考慮した場合との比較を行った。増幅率で除した応答スペクトルを以下に示す。今回求めて使用した増幅率が増幅率 1 である。既往の研究で用いられた増幅率が増幅率 2 である。図 5-1 から図の 5-3 に用いた各応答スペクトルを示す。

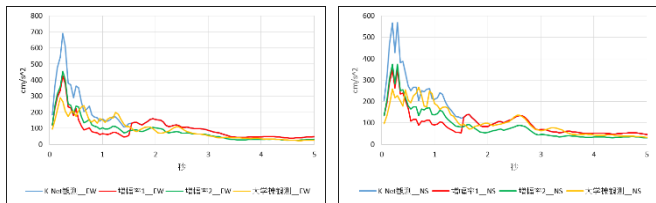


図 5-1 左から EW, NS 方向加速度応答スペクトル

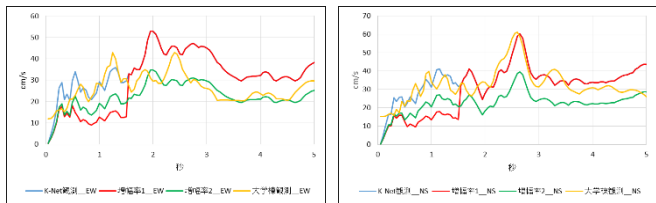


図 5-2 左から EW, NS 方向速度応答スペクトル

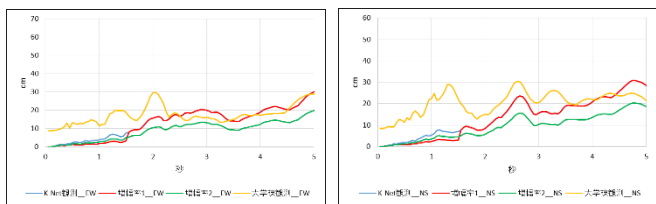


図 5-3 左から EW, NS 方向速度応答スペクトル

図 5-4 から 5-6 に応答スペクトル法を用いた結果と観測記録の比較を示す。

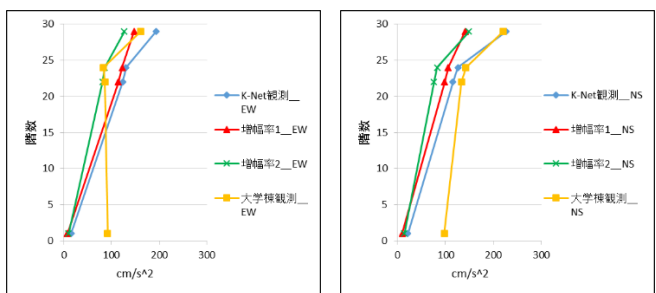


図 5-7 左から EW, NS 方向加速度比較

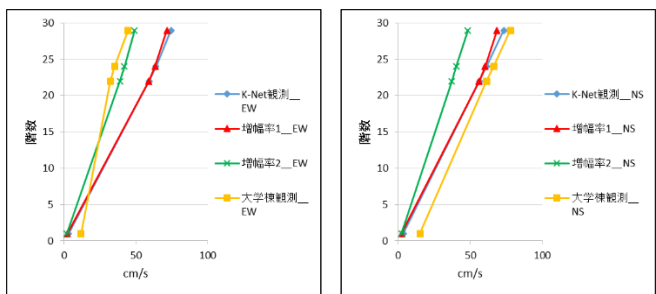


図 5-8 左から EW, NS 方向速度比較

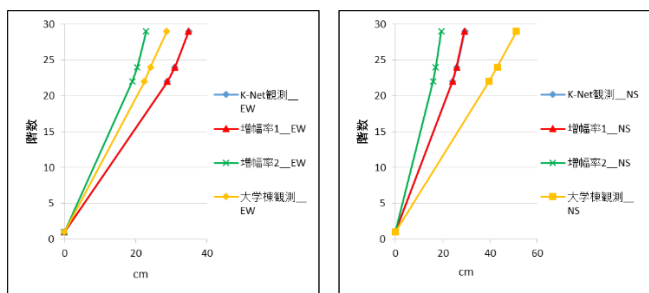


図 5-9 左から EW, NS 方向変位比較

二種類の増幅率を用いて自由基盤上の K-Net で観測記録を超高層の支持基盤である工学的基盤上での値に簡易的に落とし込んで応答スペクトル法を用いた結果、表層地盤における最大速度の増幅率で除すより、AVS30 決まるサイト特性の増幅率を考慮した場合の方が大学棟の観測記録の値に近くなった。変位においては増幅率を考慮した場合と K-Net の観測記録とあまり差が出なかった。K-Net 新宿の記録用いた他の 3 棟にも同じことが言えた。

## 6. まとめ

建物の簡易情報や推定式を用いて応答スペクトル法による観測記録との比較を行った。S 造と RC 造の超高層建築において、観測結果との比較から応答スペクトル法の妥当性を確認した。推定式のためバラツキが見られる箇所もあったが、高い相関性を持つことが分かった。

K-Net の観測記録をサイト特性による表層地盤の増幅率を考慮し、簡易的にスペクトルを補正し観測記録との比較を行った。表層地盤での最大速度の増幅率を用いるより、観測記録に近くなった。しかし、対象とした建物が少ないためさらに多くの結果を比較し、妥当性の検討をする必要がある。また、長周期地震動だけでなく短周期の地震動でも検討が必要である。

## 7. 参考文献

- 1) 西川孝夫、他：建築の振動 初歩から学ぶ建物の揺れ、朝倉書店, pp86-88, 2005. 1
- 2) 西川孝夫、他：建築の振動応用編, 朝倉書店, pp90-91, 2008. 8
- 3) 大宮憲治：長周期地震動階級を活用した超高層建築の簡易応答評価に関する研究, 工学院大学修士論文梗概集, 2013
- 4) 防災科学技術研究所：強震観測網 K-Net

<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>