

表層地盤の非線形性を考慮した杭基礎建物の被害予測に関する研究

名古屋大学大学院 環境学研究科 都市環境学専攻
博士課程前期課程 2年 護研究室 小田 侑生

1. はじめに

日本は世界有数の地震大国であり、たびたび大地震による被害に見舞われてきた。東海地方も 1944 年昭和東南海地震や 1946 年昭和南海地震など、地震被害とは決して無関係ではない。特に近年では、南海トラフにおける巨大地震の発生が危惧されており、地震調査研究推進本部¹⁾によるとマグニチュード 8 ~ 9 クラスの地震が今後 30 年以内に発生する確率は 70%とされており、被害予測やハザードマップ等の検討が急務となっている。

被害予測やハザードマップを作製する際には、地表面の地震動強さを予測する必要があり、それにあたって表層地盤における地震動増幅の評価を適切に行うことが重要であることが過去の被害事例等から確認されている。しかし、表層地盤における地震動増幅の評価手法は数多くあり、各自治体が採用している手法も様々である。

また、東北地方太平洋沖地震の際には、液状化などが生じた表層地盤が非常に軟弱である地域において、上部建物に大きな損傷がなくても杭基礎部分が破損し、建物の沈下や傾斜などの被害が生じたという報告²⁾があり、地表面の地震動強さだけではなく地中の歪や変位応答などの予測も重要であると考えられる。それらを踏まえ、本論では、表層地盤における地震動増幅の評価が手法によってどの程度幅をもつのか検討するとともに、地盤の非線形性を含む動的相互作用を考慮した解析手法を用いて杭基礎建物の地震時被害に対する検討を行う。

2 解析手法と諸元

本研究では、表層地盤における地震動増幅の評価手法として応答解析の全応力解析、有効応力解析、等価線形解析と AVS30 を用いる簡便な手法の松岡・翠川(1994)³⁾、横田他(2005)⁴⁾を採用した。ここで、AVS30 の算出は、PS 検層結果から AVS30 を算出する内閣府(2003)⁵⁾、微地形区分から算出する松岡・翠川(1994)³⁾を用いる。また、計測震度を算出する手法は応答解析には気象庁(1996)⁶⁾、簡便法には童・山崎(1996)⁷⁾を用いる。一方、杭基礎建物の解析手法は、杭周地盤ばねに非線形性を考慮した Penzien モデルを採用した。

表層地盤増幅の解析の対象地点は、地質年代・地形・沖積層基底面標高・地震基盤上面深さの既存資料に基づいてグループ分けした名古屋市内の 9 地点⁸⁾を用いた。その内、本発表では SJB 地点について述べる。SJB 地点の非線形領域の全応力解析および等価線形解析において動的変形特性は愛知県設計用入力地震動研究協議会⁹⁾のパラメータを HD モデルに取り入れたものを用いている。図 1 に SJB 地点の位置を、図 2 に S 波速度構造を示す。入力波形は八戸位相の告示波の振幅レベルをごくまれに発生する地震を基準として 1.5 倍、1 倍、0.5 倍、0.1 倍

に変化させたものを用いる。図 3 に入力地震動の加速度応答スペクトル(h=0.05)を、表 1 に解析のケース番号を示す。また、杭基礎建物の解析は SJB 地点に立地する仮想的な杭基礎の RC 構造物を対象に行う。対象建物は、地上 18 階建て RC 造事務所ビルで、場所打ち RC 杭で支持されている。建物の総重量は 26,000 t で、基礎固定時の一次固有周期は約 1 秒である。図 4 に杭の配置図を示す。杭は、杭径 B が 2.2 m で間隔 S=6.6 m ごとに総計 32 本(4*8)あり、各独立フーチング下に一柱一杭で均等配置(S/B=3)されている。表 2 に建物と杭の解析諸元を、表 3 に SJB 地点の解析諸元を示す。入力波形は八戸位相の告示波の振幅の最大値を 1 m/s²、2 m/s²、3 m/s²、5 m/s² に基準化したものを用いる。

表 1 解析ケース

	AVS30の算出	地盤増幅の算出	計測震度の算出	
1	内閣府(2003)	松岡・翠川(1994)	童・山崎(1996)	簡便法
2	内閣府(2003)	横田他(2005)	童・山崎(1996)	
3	松岡・翠川(1994)	松岡・翠川(1994)	童・山崎(1996)	
4	松岡・翠川(1994)	横田他(2005)	童・山崎(1996)	
	入力振幅レベル	地盤応答増幅手法	計測震度の算出	詳細法
5	1.5倍	等価線形解析	気象庁(1996)	
6	1倍	等価線形解析	気象庁(1996)	
7	0.5倍	等価線形解析	気象庁(1996)	
8	0.1倍	等価線形解析	気象庁(1996)	
9	1倍	全応力解析(線形)	気象庁(1996)	
10	1.5倍	全応力解析(非線形)	気象庁(1996)	
11	1倍	全応力解析(非線形)	気象庁(1996)	
12	0.5倍	全応力解析(非線形)	気象庁(1996)	
13	0.1倍	全応力解析(非線形)	気象庁(1996)	
14	1.5倍	有効応力解析	気象庁(1996)	
15	1倍	有効応力解析	気象庁(1996)	
16	0.5倍	有効応力解析	気象庁(1996)	
17	0.1倍	有効応力解析	気象庁(1996)	

表 2 建物と杭の解析諸元

上部建物								
FL 番号	高さ (m)	質量 (t)	累積質量 (t)	回転慣性 (*10 ⁴ t ^m ²)	層 番号	階高 (m)	せん断剛性 GA(*10 ³ kN)	曲げ剛性 EI(*10 ¹⁰ kNm ²)
R	64.5	1460	1460	6.28	18	3	1.29	2.3
18	61.5	1000	2460	4.06	17	3	1.33	2.61
17	58.5	1112	3572	4.92	16	3	1.37	3.04
16	55.5	1066	4638	4.65	15	3	1.41	3.29
15	52.5	1066	5704	4.65	14	3	1.53	3.38
14	49.5	1090	6794	4.75	13	3	1.71	3.75
13	46.5	1090	7884	4.75	12	3	1.75	3.73
12	43.5	1090	8974	4.75	11	3	1.78	3.78
11	40.5	1090	10064	4.75	10	3	1.89	3.85
10	37.5	1116	11180	4.95	9	3	2.06	4.24
9	34.5	1120	12300	4.95	8	3	2.12	4.21
8	31.5	1120	13420	4.95	7	3	2.16	4.2
7	28.5	1122	14542	4.98	6	3.5	2.38	4.2
6	25	1760	16302	9.82	5	5	2.25	5.15
5	20	1455	17757	6.5	4	4	2.82	5.54
4	16	1356	19113	6.22	3	4	3.67	5.63
3	12	1955	21068	8.74	2	4	15.65	6.63
2	8	1955	23023	8.74	1	7.5	inf.	inf.
1	0.5	2996	26019	17.49				
杭								
杭径 (m)	断面積 (m ²)	断面2次 モーメント(m ⁴)	単位体積重量 (t/m ³)	ポアソン 比	弾性係数 E(t/m ²)	せん断弾性係数 G(t/m ²)		
2.2	3.8	1.15	2.3	1/6	2.1*10 ⁶	9.0*10 ⁵		

3. 表層地盤の解析的検討

図5に震度増分を示す。AVS30を用いる簡便な手法、全応力解析(線形)に比べて全応力解析(非線形)、有効応力解析の震度増分が小さい。これは地盤の非線形性の考慮により、地盤のせん断歪の増大に伴う、減衰の増大が生じることが要因であると考えられる。また、非線形解析において、入力する振幅レベルが大きくなるほど震度増分が小さくなることから、地盤のせん断歪が増大し、非線形化が進行することによって、震度増分が減少することが確認された。各手法による震度増分の評価の差は1.4程度あり、気象庁震度階に照らし合わせると3段階程度の違いである。ここで、簡便法は詳細法に対して、被害を大きく、安全側の評価をしているので地表の被害予測をする際は、簡便法が有効な手段であると考えられる。しかし、被害予測を行う際は各手法の結果に差が生じる可能性があることを念頭に置いて行うことが重要である。また、地中に杭などの構造物がある場合は、震度増分だけではなく地中の変位やせん断歪を検討することが必要となる。

4. 動的相互作用を考慮した杭基礎建物の解析的検討

まず、自由地盤の応答について確認する。図6に自由地盤の応答を示す。地表の加速度応答スペクトルから、線形解析に比べて非線形解析のピークが低振動数側に移動している。これは、入力が大きくなるに伴い顕著になっており、地盤の非線形化によって剛性が低下し、卓越周期が長周期化したためである。地盤の卓越周期の変化や剛性の低下によって、杭への入力の低減や、地盤の建物慣性力に対する抵抗が小さくなるなど、建物・杭の応答に影響を及ぼすと考えられる。

次に有効入力動を検討する。図7に示す杭頭と自由地盤の地表の加速度応答スペクトル比を見ると、1 Hz付近から有効入力動が低減しており、5 Hz付近で0.5程度となっている。一般的に入力の相互作用では波長の短い、高振動数側の入力の低減が大きいとされているが、この結果もそれに対応している。また、地盤の非線形化によって地盤から杭への入力に変化が生じると予想していたが、少なくとも今回の建物・杭の諸元の場合は、入力損失効果に大きな違いはなく地盤の非線形化による自由地盤の応答の変化が杭や上部建物の応答に大きく影響すると思える。

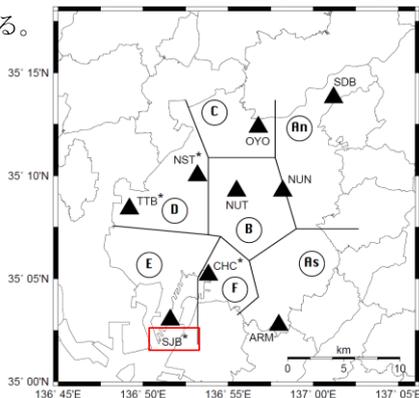


図1 対象地点

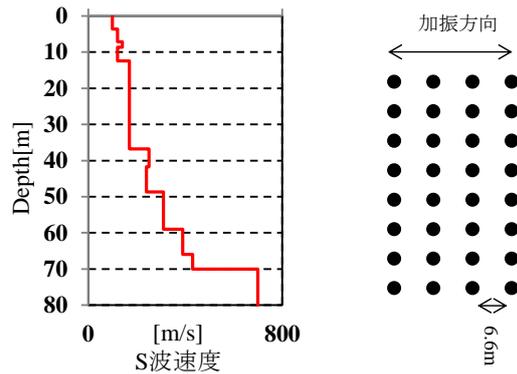


図2 SJB地点のS波速度構造

図4 杭の配置図

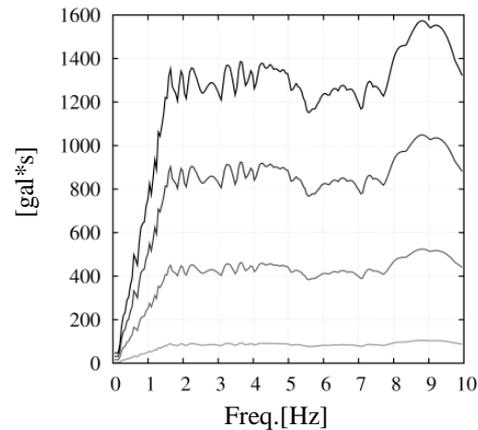
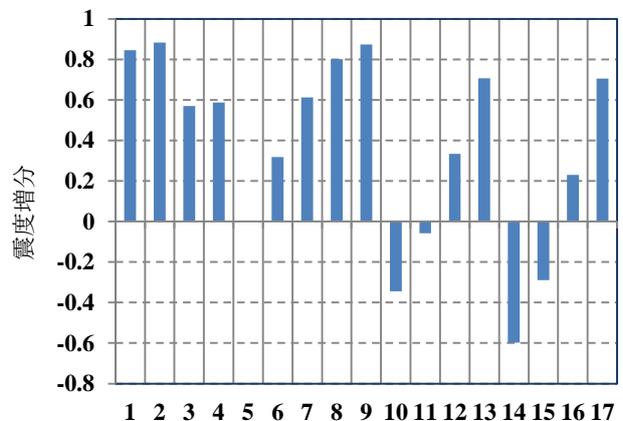


図3 入力地震動の加速度応答スペクトル



解析ケース

図5 震度増分

表3 SJB地点の解析諸元

土質	深さ(m)		動的変形特性			密度 $\rho(t/m^3)$	S波速度 $V_s(m/s)$	初期せん断剛性 $G_0(kPa)$
	上端	下端	$\gamma_{0.5}$	h_{max}	τ_{max}			
Bs	0	3.6	7.83E-04	0.246	14.09	1.8	100	18000
Bs	3.6	4.6	7.83E-04	0.246	20.3	1.8	120	25920
Ac1	4.6	7.2	1.67E-03	0.196	43.29	1.8	120	25920
As1	7.2	8.7	5.92E-04	0.237	20.89	1.8	140	35280
Ac2	8.7	12.5	1.16E-03	0.275	30.04	1.8	120	25920
As2	12.5	17.5	9.50E-04	0.287	49.4	1.8	170	52020
Ac3	17.5	36.8	2.46E-03	0.286	113.69	1.6	170	46240
Dms1	36.8	41.7	1.15E-03	0.221	136.56	1.9	250	118750
Dmc	41.7	48.7	1.29E-03	0.193	126.32	1.7	240	97920
Dms2	48.7	59	1.15E-03	0.221	209.98	1.9	310	182590
Dms3	59	66	1.15E-03	0.221	332.34	1.9	390	288990
Dmg	66	70	1.15E-03	0.221	467.8	2.2	430	406780
Ps	70	80	-	-	-	2.1	700	1029000

次に杭の応答について検討する。図8に杭の応答を示し、表4に杭の応答をまとめる。図8から、杭頭の加速度応答スペクトルの1 Hz付近にピークが見られる。これは、上部建物の固有周期付近で、上部建物の応答が杭の応答に影響していると考えられる。また、ピークは非線形解析になると、低振動数側に若干移動している。これは、地盤の剛性低下による卓越周期の長周期化の影響だと考えられる。さらに、入力が大きくなり、地盤の非線形化が進行するとせん断応力・曲げモーメントの杭頭およびその周辺部の応答が大きくなるなど分布に変化が見られる。これは、地盤の非線形化により自由地盤の応答において地中深い部分における変位が大きくなったということもあるが、特に建物慣性力の影響を受けていると考えられる。つまり、地盤が非線形化し、剛性が低下することで、杭周辺地盤の建物慣性力に対する抵抗が減少し、杭の負担が増加したと考えられる。表4から、入力が 2 m/s^2 以上の場合、杭の応答が降伏曲げモーメントに達している。加えて、入力の増加に伴い、 2 m/s^2 では杭頭部、 3 m/s^2 では深さ5m付近、 5 m/s^2 では深さ7m付近と、より深い部分まで杭の応答が大きくなっている。このことから、地盤の非線形化が進行することで杭の応答が相対的に大きくなる可能性があり、地震時に非線形化が顕著となる軟弱な地盤において、地盤の非線形化の進行度を考慮しないと被害を過小評価してしまう可能性があるため、地盤の非線形性を考慮することが重要であると考えられる。

次に上部建物の応答について検討する。上部建物の応答に際して、動的相互作用を考慮した場合と考慮しない場合の解析を行った。図9に動的相互作用を考慮した場合の上部建物の応答を示し、表5に両者の応答をまとめる。表5から、動的相互作用を考慮する場合と考慮しない場合では各応答の値は動的相互作用を考慮した方がかなり小さくなっている。これは、動的相互作用を考慮することによって、入力損失効果が生じるとともに、基礎から地盤に揺れが伝わり逃げていく、いわゆる逸散減衰が生じているためと考えられる。加えて、杭周辺地盤が非線形化することによって地盤ばねの履歴減衰が増加したことも影響したと考えられる。このことから、上部建物の応答は、動的相互作用を考慮することによって相対的に低減するが、動的相互作用効果を正確に把握できない場合は応答を過小評価してしまう可能性があるため、動的相互作用を考慮しないものと比較しながら検討すべきである。また、図9から、スペクトルのピークは1 Hz付近にあり、上部建物の固有周期が表れている。また、 1 m/s^2 の場合では、線形解析が非線形解析に比べて各応答が大きく、線形解析の 1 m/s^2 と非線形解析の 3 m/s^2 の各応答が同程度となっている。これは、地盤が非線形化することで上部建物の応答が低減する可能性を示している。さらに、上部建物応答が同程度となる線形： 1 m/s^2 の場合と非線形： 3 m/s^2 の場合において、図8に示した杭の

応答は非線形の方がかなり大きくなっていることから、上部建物の応答が同程度でも、地盤の非線形化の状態によって杭の応答に違いが生じることが示されていると考えられ、地盤の非線形性の考慮の重要性が表れている。

5. まとめ

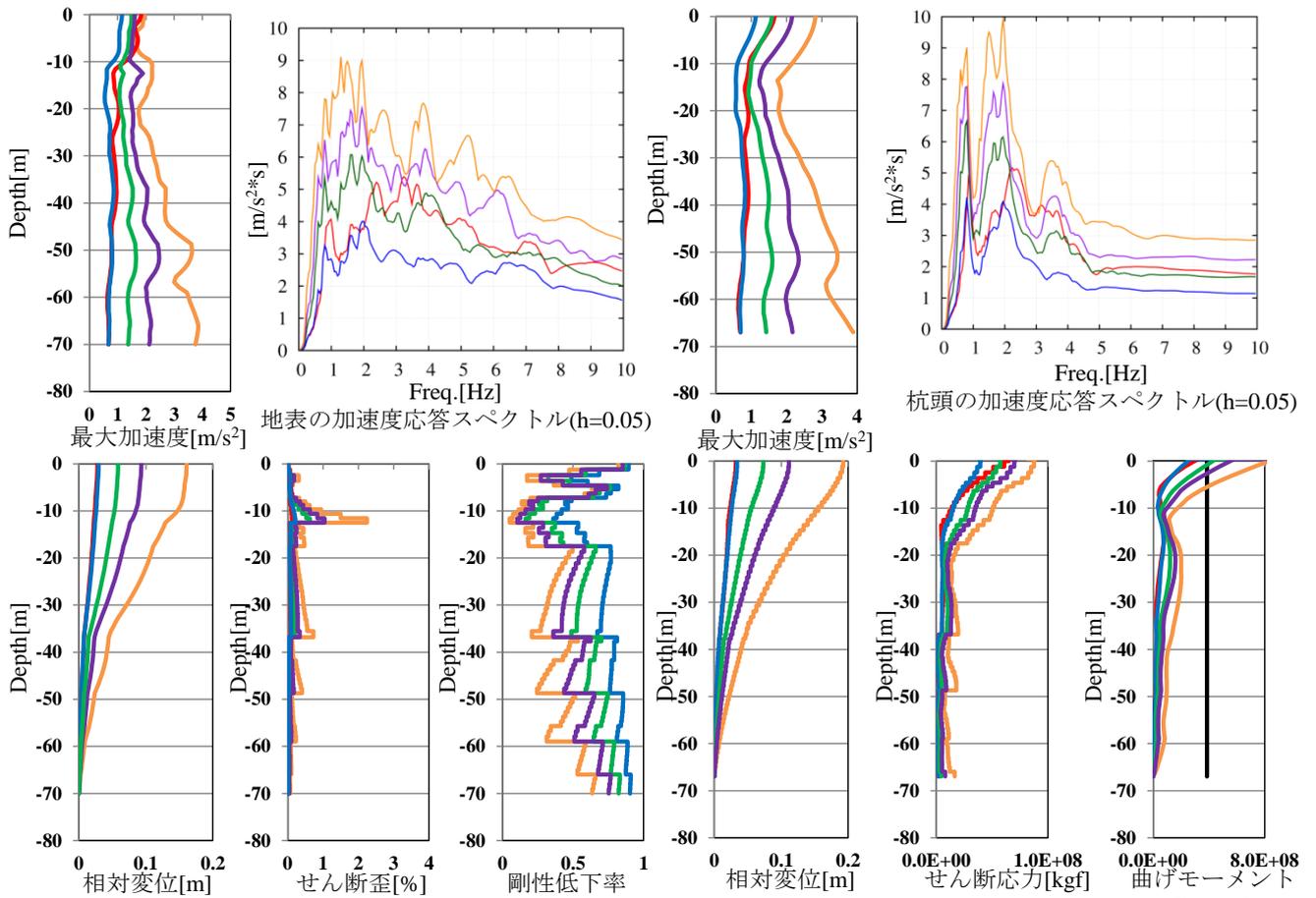
本検討によって得られた知見を以下に述べる。

表層地盤における地震動増幅の評価において、本検討では、各評価手法の結果に気象庁震度階に照らし合わせると、3段階程度の差が生じた。ここで、簡便法は安全側の評価となっており、地表の被害予測においては有効であるが、被害予測を行う際は各手法の結果に差が生じるということを念頭に置き検討する必要がある。杭など地中に構造物がある場合は震度増分だけではなく、地中のせん断歪等を考慮する必要がある。

地盤の非線形化が基礎への入力損失効果に与える影響はほとんどなく、自由地盤の非線形化による応答の変化が建物・杭の応答に大きく影響することが分かった。また、地盤が非線形化し、自由地盤の応答において地中深い部分における変位が大きくなるとともに、剛性が低下することで、杭周辺地盤の建物慣性力に対する抵抗が減少し、杭の負担が増加して杭の応答が大きくなり、被害が生じることが考えられる。また、地盤の非線形化により上部建物の応答が低減される可能性がある。このことから、上部建物の応答が同程度でも地盤の非線形化の状態によって杭の応答に大きく違う可能性があるため、地盤の非線形性を考慮しないと杭の応答を過小評価してしまう可能性がある。さらに、上部建物の応答は、動的相互作用を考慮しないものと比較しながら検討すべきである。

参考文献

- 1) 地震調査研究推進本部 HP
http://www.jishin.go.jp/regional_seismicity
- 2) 中井正一：東北地方太平洋沖地震による杭被害のメカニズム 日本建築学会 大地震における地盤と基礎構造の諸問題と耐震設計 2015/9
- 3) 松岡昌志・翠川三郎(1994)：国土数値情報とサイスミックマイクロゾーニング 第22回地盤震動シンポジウム 日本建築学会 P23-34 1994
- 4) 横田崇・稲垣賢亮・増田徹(2005)：数値実験による地盤特性と増幅率の関係 日本地震学会講演予稿集 P86 2005/10
- 5) 南海トラフ巨大地震モデル検討会第15回：浅い地盤構造モデルについて 2012/3
- 6) 気象庁 HP：計測震度の算出方法
http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/kaisetsu/cal_c_sindo.htm
- 7) 童華南・山崎文雄(1996)：地震動強さ指標と新しい気象庁震度との対応関係 生産研究 48 巻 P31-34 1996/11
- 8) 愛知県設計用入力地震動研究協議会(2006)：愛知県設計用入力地震動の作成 想定地震による強震動予測(改訂版)
- 9) 愛知県設計用入力地震動研究協議会：愛知県設計用入力地震動の作成想定地震による強震動予測報告書 2002/2



降伏曲げモーメント 線形:1m/s² 非線形:1m/s²
 非線形:2m/s² 非線形:3m/s² 非線形:5m/s²

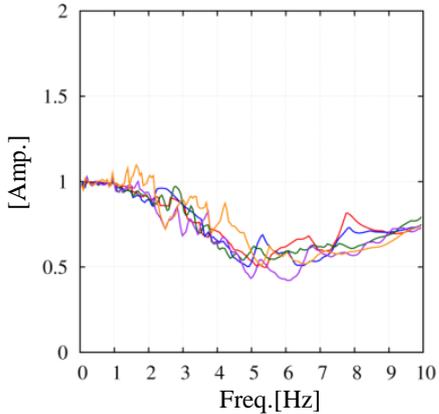


表4 推定された杭頭部の曲げモーメント応答

線形1 m/s ²	非線形1 m/s ²	非線形2 m/s ²	非線形3 m/s ²	非線形5 m/s ²
降伏無	降伏無	降伏有 (杭頭)	降伏有 (5m)	降伏有 (7m)

表5 上部建物の応答

動的相互作用の考慮	屋上の基礎上面に対する相対変位(m) 屋上の最大加速度(m/s ²)				
	線形1 m/s ²	非線形1 m/s ²	非線形2 m/s ²	非線形3 m/s ²	非線形5 m/s ²
有	0.14 5.3	0.08 3.1	0.11 4.3	0.14 5.1	0.16 6.23
無	0.32 14.1	0.19 8.6	0.3 13.1	0.36 16	0.47 18

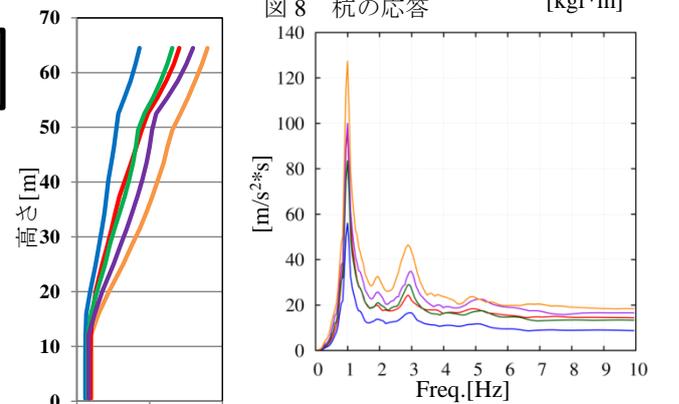


図9 上部建物の応答

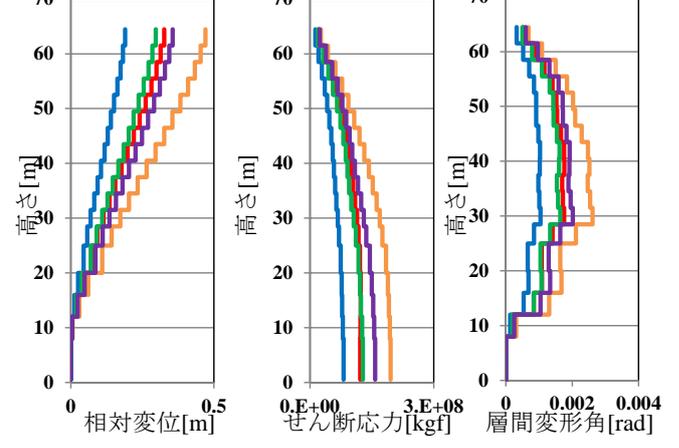


図9 上部建物の応答