

表層地盤の層厚を考慮した鋼構造建築物の地震応答解析

準会員 ○菅沼小鉄^{*1} 正会員 三田凛也^{*2}正会員 永野康行^{*3}

2.構造-2.振動-g.建物応答特性とその評価

表層地盤, 地震動増幅特性, 時刻歴応答特性, 固有周期, 鋼構造建築物

1. はじめに

現在、建築基準法に基づいて構造設計を行う際、高さ 60 m を超える超高層建築物は、建物をモデル化し、時間の変化とともに変化する地震動を与えて解析を実行する時刻歴応答解析を行うことで、建物が自身によってどのような応答を示すのかを検証している。

一方、建物高さが 60 m 以下で構造計算を必要とする建築物に対しては、過去の地震データや傾向から設定された値を導入した式を用いて、建物の重許容応力度等の計算や保有水平耐力等の検討を行う。この計算で考慮すべき地震荷重を求める際、建物の重さなどの他に振動特性係数（以下より R_t とする）を考慮する必要があるが、この値は、該当の建物の弾性域における設計用一次固有周期及び地盤の種別に応じて算定されるもので、固有周期は建物高さなどから、地盤の種別はその地盤を構成する要素や深さ等によって区別されている。そのため、実際の設計では、建築するエリアが同一であったとしても、表層地盤の構成が異なり、 R_t の値も異なってしまう。三田らは¹⁾ 表層地盤の層厚と地盤種別の種類の組み合わせから、建築基準法の構造設計では検討されない、表層地盤厚を変化させることによって、建築物の地震に対する応答に違いが生まれることを明らかにしている。

本報告の目的は、まず、表層地盤の層厚を変化させ、地表面の加速度応答スペクトルから表層地盤の卓越周期の違いを調査し、上部構造物の建物高さによる最大層せん断力と最大層間変形角の違いを調査することである。

2. 数値実験例：解析条件

2.1 入力地震動

入力地震動はあらかじめ ShakePRO-L²⁾ に搭載されている平成 12 年建設省告示第 1461 号四号イ³⁾ で示されている「極めて稀に発生する地震動」の応答スペクトルに適合した、位相分布の異なる 3 種類の告示波である JMA Kobe NS、Hachinohe EW、Random を使用する。

表層地盤は昭和 55 年建設省告示第 1793 号⁴⁾ に示されている建築物の基礎の底部の直下の地盤の種別に応じて、

掲げられる数値（以下、 T_c とする）を基に地盤種別 3 種類を表現する。図 1 に表層地盤モデルを示す。図 2 において H は層厚、 V_s は表層地盤内の S 波速度である。地盤種別ごとの T_c は第一種地盤が 0.4 s、第二種地盤が 0.6 s、第三種地盤が 0.8 s である。 V_s は以下の式(1)によって算定する。

$$T_c = 4H / V_s \quad (1)$$

せん断歪み依存性は古山田ら⁵⁾ が提案している非線形モデルを使用する。

2.2 入力地震動

DynamicPRO⁶⁾ を用いて解析対象とする上部構造を多質点系モデルに置き換え、表層地盤特性を考慮した地震動を用いて地震応答解析を行う。基礎固定として、表層地盤と上部構造の相互作用は考慮しないものとする。図 3 に上部構造モデルを示す。図 3 において、 i は層番号、 w_i は i 層重量、 h_i は i 層の階高、 k_i は i 層の剛性である。入力地震動は 2.1 の解析結果である表層地盤特性を考慮した地震動とする。

復元力特性は図 2 に示すように、バイリニア型で標準型の履歴とする。減衰は剛性比例型とする。荷重-変形関係が明らかでない場合、以下の方法で算定する。弾性域を層間変形角 0 rad 以上 1/200 rad 以下、塑性域を 1/200 rad 超過 1/75 rad とする。第一折れ点荷重を 1/200 rad とし、保有水平耐力を 1/75 rad とする。

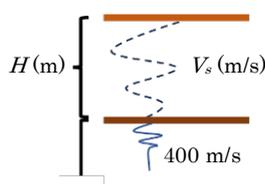


図 1 表層地盤モデル

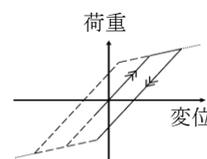


図 2 復元力特性

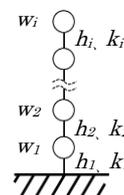


図 3 上部構造モデル

3. 数値実験例：解析結果

3.1 表層地盤

3.1.1 解析概要

地盤種別ごとの表層地盤の固有周期は変えず、層厚 H を 20m、25m、30m とした場合を想定する。表 1 に表層地盤の物性値を示す。せん断歪み依存性は ShakePRO-L にあらかじめ搭載されている「平均・砂質土（古山田・宮本モデル）⁵⁾」を使用する。

表 1 表層地盤の物性値

H (m)	V_s (m/s)		
	第一種	第二種	第三種
20	200	133	100
25	250	167	125
30	300	200	150

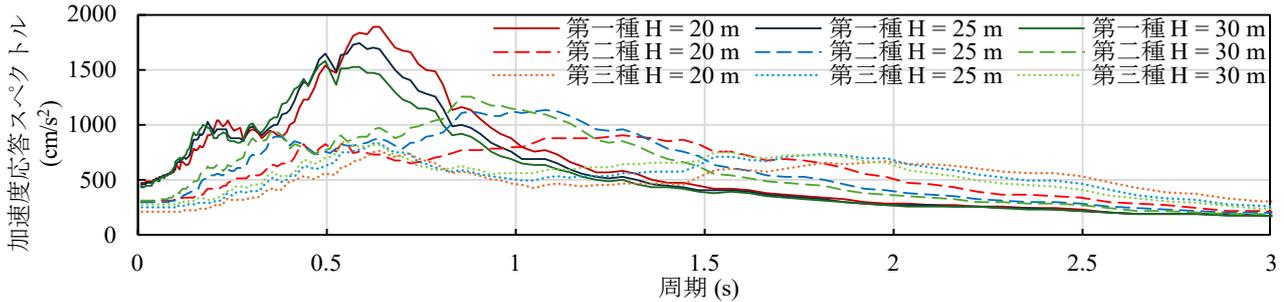


図 4 表層地盤特性を考慮した地震動の加速度応答スペクトル ($h=0.05$)

3.1.2 解析結果

図 4 に 3 種類の入力地震動における表層地盤特性を考慮した地表での加速度応答スペクトルの平均を表す。第一種地盤の場合、層厚が薄いほど加速度応答スペクトルは大きくなり、特に周期 0.5 s から 1 s の間で大きな値の差が見られた。一方、第二種地盤と第三種地盤の場合、層厚が薄いほど加速度応答スペクトルは小さくなり、第二種地盤では周期 1s 付近で、第三種地盤では周期 0.5 s と 1.5 s 付近でその傾向が見られた。

3.2 上部構造

3.2.1 解析概要

本節では、構造設計・部材断面事例集 7) から建物高さの異なる鋼構造建築物 S-1、S-4、S-10 を用いて、時刻歴応答解析を実行する。以下の表 2 に建物の物性値を示す。それぞれ、軒高 20.5m の 5 階建て、軒高 40.3m の 10 階建て、軒高 58.0m の 14 階建ての建物である。ペントハウスは質点に置き換えず、最上階にペントハウスの重量を含むものとする。

表 2 上部構造の物性値

i	S-1			S-4			S-10		
	w_i (kN)	h_i (cm)	k_i (kN/cm)	w_i (kN)	h_i (cm)	k_i (kN/cm)	w_i (kN)	h_i (cm)	k_i (kN/cm)
14							6806	410	3459
13							5339	410	4019
12							5339	410	4296
11							5339	410	4647
10				7029	395	3703	5404	410	5120
9				5561	395	4110	5418	410	5329
8				5561	395	4380	5418	410	5606
7				5600	395	4784	5461	410	5929
6				5630	395	5056	5477	410	6080
5	7639	395	3235	5671	395	5314	5477	410	6236
4	5523	395	3448	5695	395	5555	5504	410	6504
3	5523	395	3513	5713	395	5729	5526	410	6762
2	5523	395	3589	5724	395	6175	5537	410	7448
1	5567	470	3714	5773	462	7781	5585	460	10185

3.2.2 解析結果

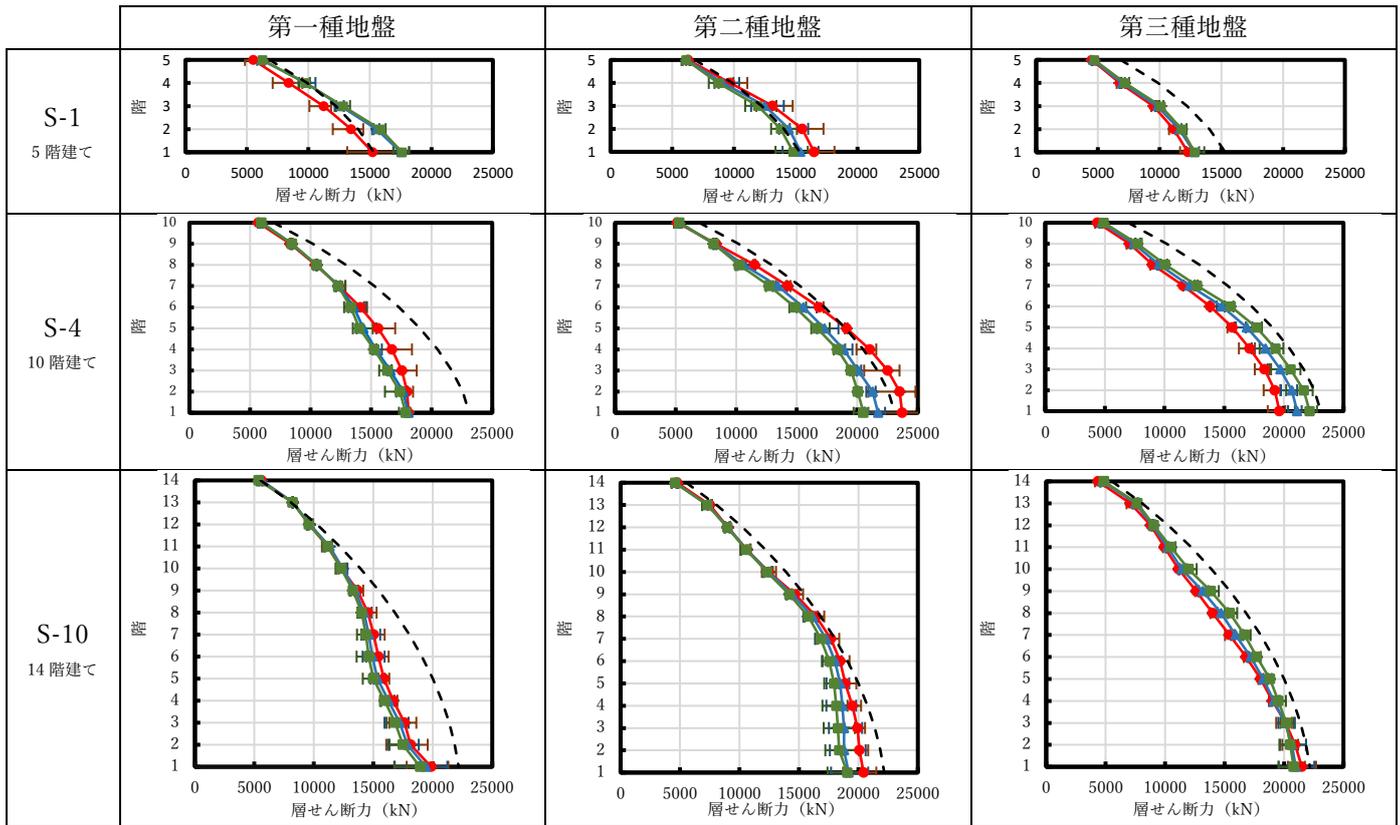


図5 最大層せん断力 —●— 層厚 H=20m —■— 層厚 H=25m —▲— 層厚 H=30m - - - 保有水平耐力

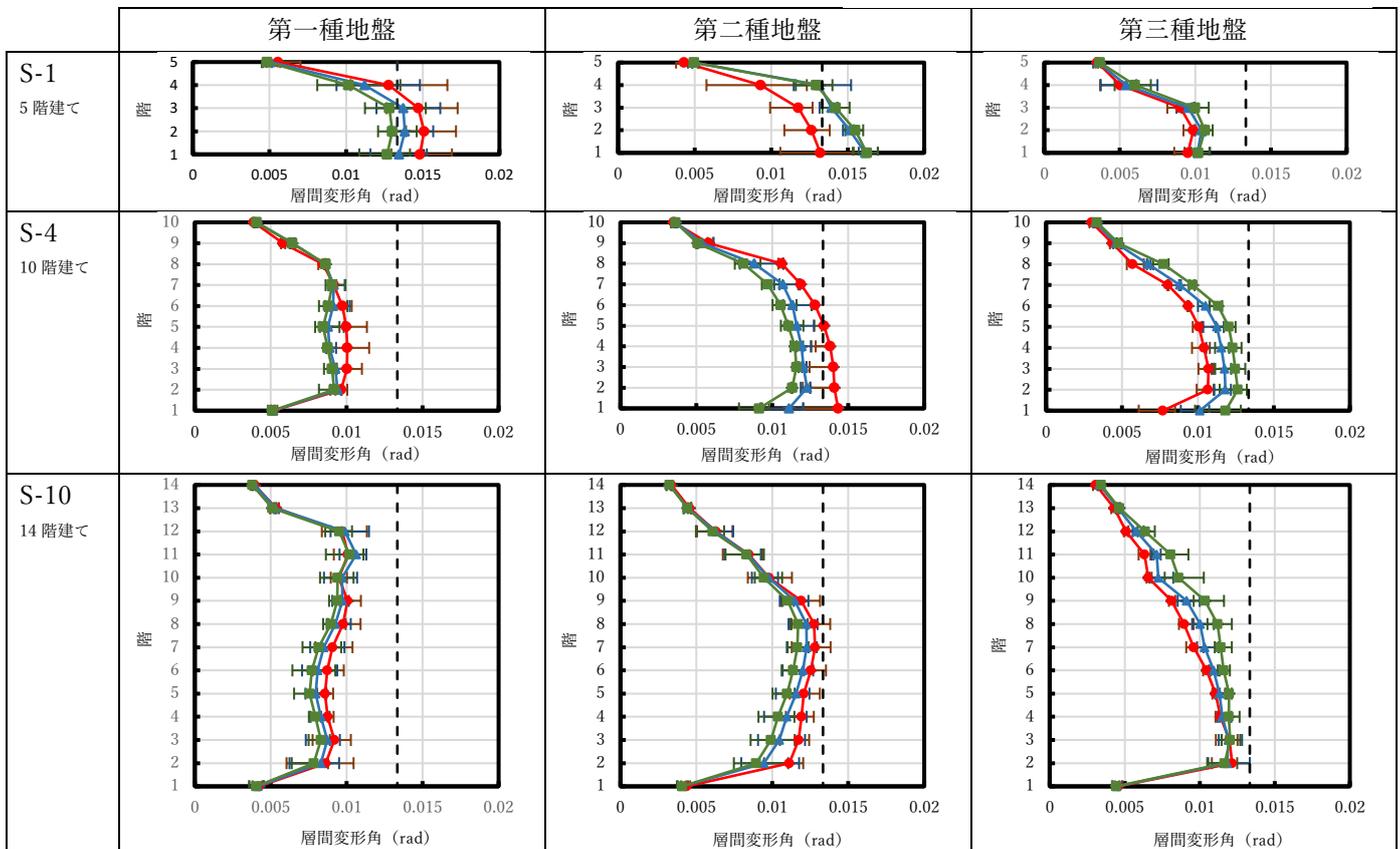


図6 最大層間変形角 —●— 層厚 H=20m —■— 層厚 H=25m —▲— 層厚 H=30m - - - 許容変形角 1/75 rad

本節では、5階、10階、14階建ての鋼構造建築物に対して時刻歴応答解析を行った結果について考察する。上記の図5と図6にその結果を示している。

解析の結果、第一種地盤では、最大層せん断力は建物高さが高くなるにつれて、最大層間変形角は建物高さが低くなるにつれて、応答の値が大きくなった。第二種地盤における最大層間変形角の結果でも、第一種と同様に建物高さが低くなるにつれて、大きい応答値が得られたが、最大層せん断力の結果では、S-4の10階建て建物から最も大きい値が出た。第三種地盤では最大層せん断力はS-1、S-4、S-10の順で大きい結果が得られ、最大層間変形角ではS-4とS-10の間ではあまり大きな値の差は見られなかった。また層厚と得られる値の大小の順番に着目すると、最大層せん断力と最大層間変形角のどちらにおいても、第一種地盤と第二種地盤で層厚が厚くなるにつれて、第三種地盤では層厚が薄くなるにつれて、値が大きくなった。第一種地盤におけるS-1の最大層せん断力と、第二種地盤におけるS-1の最大層間変形角については、層厚が薄くなるにつれて値が大きくなる、という結果となった。

また、層厚20mの第二種地盤に建つS-4の10階建ての建物で、層せん断力、層間変形角ともに、他の層厚での値と比較して、大きい値が得られた。特に値の差が大きい一階部分に着目すると、最大層せん断力は約2000(kN)、最大層間変形角は約 3.0×10^{-3} radの開きが見られた。

4.まとめ

本研究では、3.1で表層地盤の層厚を変化させた場合の地盤の加速度応答スペクトルを解析した後、鋼構造建築物が異なる地盤種別、表層地盤の層厚、解析対象とする建物の高さ(階数)、の3つのパラメーターを変化させた結果として得られる最大層せん断力と最大層間変形角の値の差を検討した。

結果として、第一種地盤においては層厚が薄いほど、加速度応答スペクトルは大きくなり、第二種地盤と第三種地盤では、層厚が厚いほど値は大きくなった。また、上部構造についての解析を行った結果、最大層せん断力については、第一種地盤と第三種地盤で建物高さが高くなるにつれ

て値が大きくなり、第二種地盤では、中層のS-4の10階建ての建物で最も大きい値を示した。また最大層間変形角では、第一種地盤と第二種地盤で、建物高さが高くなるにつれて値が小さくなり、第三種地盤では高さが高くなるにつれて値が大きくなった。

また、第一種地盤ではS-1の最大層せん断力を例外として、表層地盤の層厚が薄いほど、表層地盤の加速度応答スペクトルの結果の傾向と同様に、値が大きくなった。第三種地盤においても、同じ傾向が見られたが、第二種地盤ではS-1の最大層間変形角の値を除いて、層厚が薄くなるほど値が小さくなる、異なる傾向が見られた。

今後の展望として、更に階層を高くした建物モデルを追加して解析を行うことや、5階や10階、14階の分類を更に細分化した解析を行うことを検討していく。

謝辞

解析にはユニオンシステム株式会社より導入している「研究室バック」のうちShake PRO-LとDynamic PROを使用した。ここに記し、謝意を表す。

参考文献

- 1) 三田凜也、河村咲季、荘所直哉、永野康行：表層地盤による地震動増幅を考慮した鋼構造建築物の地震時建物応答の比較、日本建築学会学術公演梗概集(関東)、pp.437-438、2024
- 2) ユニオンシステム株式会社:Software library SS21 / ShakePRO-L 解説書、ShakePROL.pdf
- 3) 官報,建設省告示第1461号、2000
- 4) 官報,建設省告示第1793号、1980
- 5) 古山田耕司、宮本裕司、三浦健司:多地点での原位置最終試料から評価した表層地盤の非線形性、第38回地震工学会研究発表会、pp.2077-2078、2003
- 6) ユニオンシステム株式会社：Software library SS21 / DynamicPRO 解説書、dynpro.pdf
- 7) 日本建築防災協会：構造設計・部材断面事例集、pp.496-501、2007

*1 兵庫県立大学環境人間学部環境人間学科 学生

*2 兵庫県立大学大学院減災復興政策研究科 博士前期課程 院生

*3 兵庫県立大学大学院減災復興政策研究科 教授・博士(工学)

*1 Undergraduate Student, Sch. Hum. Sci. and Env., Univ. Hyogo

*2 Graduate Student, Grad.Sch. Dis. Res. and Gov., Univ. Hyogo

*3 Prof., Grad.Sch. Dis. Res. and Gov., Univ. Hyogo, Dr. Eng.