

表層地盤の地震動増幅特性を考慮した鋼構造建築物の地震時挙動

準会員 ○三田凜也*1 正会員 荘所直哉*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，時刻歴応答解析，固有周期，鋼構造建築物

1. はじめに

建築基準法に定められている耐震設計において建築物の設計条件には、地震荷重を算定する際に表層地盤の影響を考慮する振動特性係数（以下、 R_t とする）がある。 R_t は建築物の設計用一次固有周期と表層地盤の種類によって決定する。設計条件では表層地盤は3種類の地盤種別に分類されている。しかし、実際の表層地盤はエリアが異なれば、表層地盤の深度や土質、土層などの構成も異なる。そのため、地盤種別による分類が同じエリアでも表層地盤の構成が異なれば地震動増幅特性も異なる。また、表層地盤が建築物に与える影響を検討する場合、表層地盤による地震動増幅特性について考慮するだけでなく表層地盤と建築物を一体に考慮する必要がある。考慮が必要な例として共振現象などが挙げられる。建物高さ60m以下の中低層の建築物は時間的、経済的観点などから構造設計時には時刻歴応答解析を通常行わないため、 R_t などを用いた建築基準法で定められた設計条件が使用される。ところが、この設計条件では表層地盤が与える影響についての検討が十分に行われているとはいえない。清水ら¹⁾や時松ら²⁾は木造建物が被害を受ける大きさの要因の一つとして、表層地盤が影響することを確認している。したがって、耐震設計における建築物の設計条件で表層地盤を考慮する方法は簡便であるが、実際は各表層地盤に応じた地震動増幅を考慮した上で建築物への影響を必要があるといえる。

本研究では、表層地盤を3種類に分類したときの地震動増幅特性と建築物への影響を明らかにすることを目的とする。

2. 研究方法

ShakePRO-L³⁾で地盤種別3種類を想定した表層地盤による地震動増幅特性の違いを時刻歴応答解析に

より明らかにする。解析結果から得られた表層地盤により増幅した地震波を用いて、DynamicPRO⁴⁾で建築物にもたらす影響を時刻歴応答解析により明らかにする。このとき、地盤と建築物の相互作用は考えないものとする。

入力地震波はあらかじめShakePRO-Lに搭載されている、平成12年建設省告示第1461号四号イ⁵⁾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種類の地震動データを使用する。図1に3種類の位相の加速度の時刻歴波形を示す。それぞれ(a) JMA神戸NS位相、(b) 八戸EW位相、(c) 乱數位相を用いている。

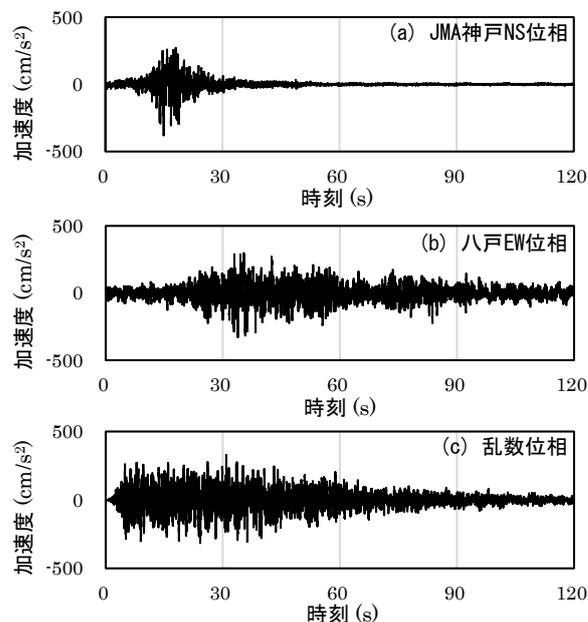


図1 3種類の入力地震波 加速度の時刻歴波形

表層地盤はShakePRO-Lを用いて解析を行う。図2に示すように H ：表層地盤厚、 V_s ：せん断波速度、工学的基盤から表層地盤に入射するせん断波速度を400 m/sとする。また、本研究では表層地盤は1層か

らなるものとする。せん断歪み依存性は非線形として解析を行う。せん断歪み依存性が非線形の場合、せん断歪みが増加すると、せん断剛性比は減少、減衰定数は増加する。せん断剛性比と減衰定数はともに層ごとに等価として扱う。

上部構造はDynamicPROを用いて、解析対象とする建物を質点系モデルに置き換え、基礎固定として解析を行う。本研究では、地盤と建物の相互作用は考慮せず、表層地盤により増幅された地震波を用いて建物の解析を行う。図3に示すように、 i ：階層、 w_i ： i 層での層重量、 k_i ： i 層でのせん断剛性、 h_i ： i 層での階高とする。復元力特性は弾性と弾塑性の2種類で解析を行う。

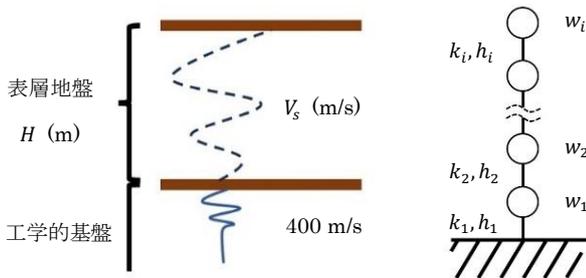


図2 表層地盤モデル 図3 質点系モデル

3. 解析例題

3.1. 地盤種別3種類の地震動増幅特性

地盤種別3種類の表層地盤である第一種地盤、第二種地盤、第三種地盤(以下、第一種、第二種、第三種とする)を昭和55年建設省告示第1793号⁶⁾で示されている固有周期 T_c により再現する。4分の1波長則から表層地盤のせん断波速度 V_s を算出する。表1に地盤種別ごとの特性値を示す。また、本研究では、せん断歪み依存性は図4に示す、あらかじめShakePRO-Lに搭載されているせん断歪み依存データである平均・砂質土【古山田・宮本モデル】を採用する。

表1 地盤種別ごとの特性値

地盤種別	T_c (s)	H (m)	V_s (m/s)
第一種	0.4	30	300
第二種	0.6		200
第三種	0.8		150

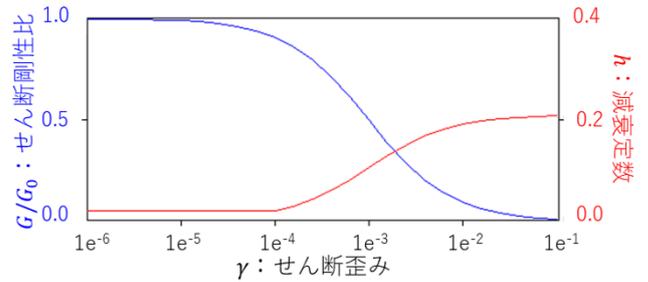


図4 平均・砂質土【古山田・宮本モデル】³⁾

解析の結果、地表面での加速度は第一種、第二種、第三種の順に大きくなった。地表面での変位と減衰定数は第三種、第二種、第一種の順に大きくなった。本研究では、表層地盤を1層としており減衰定数は層ごとに等価として扱われるため、固有周期が大きい表層地盤は加速度が大きく増幅しないが変位は増幅が大きくなる。一方、固有周期が小さい表層地盤は変位が大きく増幅しないが加速度は大きく増幅する。

入力地震波3種類とも解析結果は同じ傾向にあったため、代表して、図5に八戸EW位相についての地盤種別3種類の時刻歴加速度の解析結果を示す。それぞれ(a)第一種、(b)第二種、(c)第三種のデータである。

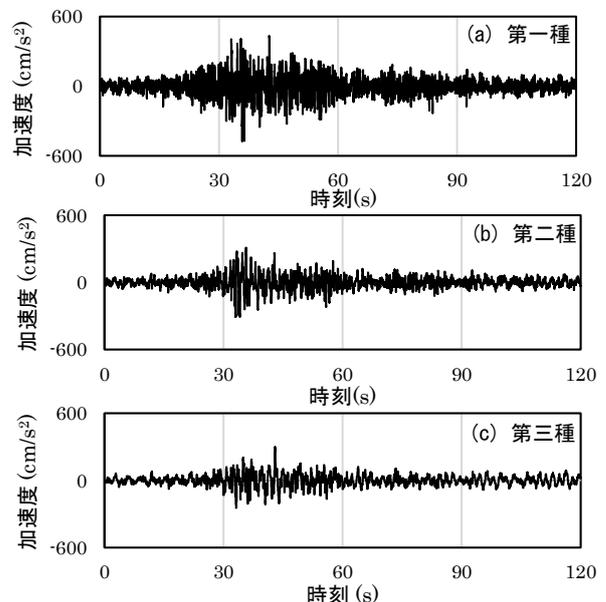


図5 解析結果 地表面での加速度の時刻歴波形

3.2. 上部構造の地震時挙動

構造設計・部材断面事例集⁷⁾(以下、設計事例集とする)の高さ20.5mの鉄骨造設計事例S-1(以下、S-1とする)をモデルとして採用する。図6に示すように、5階建てで

ある S-1 を 5 質点系モデルに置き換える。設計用一次固有周期は 0.615 s、建物周期は 0.940 s である。表 2 に S-1 モデルの特性値を示す。

入力地震波は 3.1 節の解析結果から得られた地表面での加速度を使用する。復元力特性が弾塑性の場合、塑性タイプをバイリニア、履歴タイプを標準型とする。設計事例集を基に計算し評価した復元力特性を使用する。図 7 に弾性、図 8 に弾塑性の復元力特性モデルを示す。

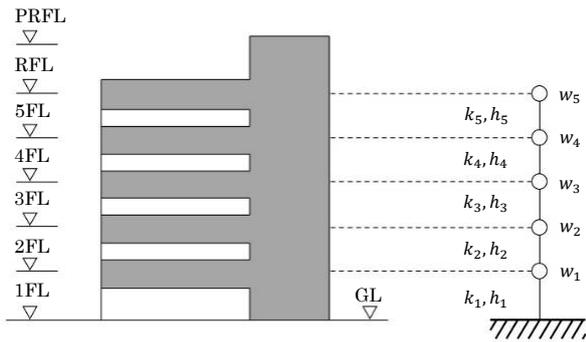


図 6 上部構造モデル

表 2 上部構造の特性値

i	h_i (cm)	w_i (kN)	k_i (kN/cm)
5F	395	7693	3235
4F	395	5523	3448
3F	395	5523	3513
2F	395	5538	3589
1F	470	5567	3714

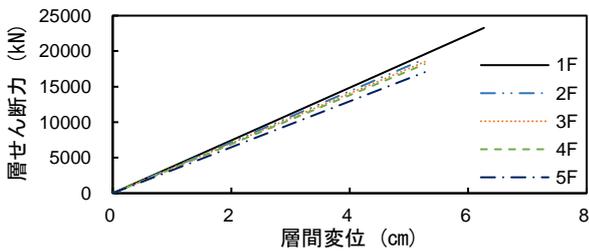


図 7 弾性復元力特性モデル

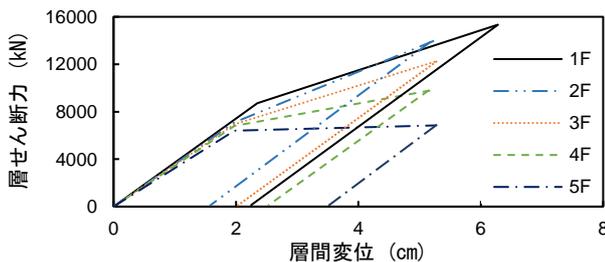


図 8 弾塑性復元力特性モデル

解析の結果、復元力特性が弾性、弾塑性のどちらの場合も、最大層間変形角および最大層せん断力は第二種、第一種、第三種の順で大きくなった。復元力特性が弾塑性の場合は、弾性的の場合に比べて応答値が小さくなった。最大層間変形角では、第二種るとき、応答値が大きく減少し、第一種るとき、応答値が 1/75 rad 以内に収まった。層せん断力では、第二種るとき、応答値はおよそ半分以下になり、第一種るとき、応答値は保有水平耐力に近い値になった。

入力地震波 3 種類とも解析結果は同じ傾向にあったため、代表して、八戸 EW 位相を用いたときの解析結果である最大層間変形角、最大層せん断力をそれぞれ図 9、図 10 に示す。(a)に復元力特性弾性、(b)に弾塑性の場合の応答値を示す。

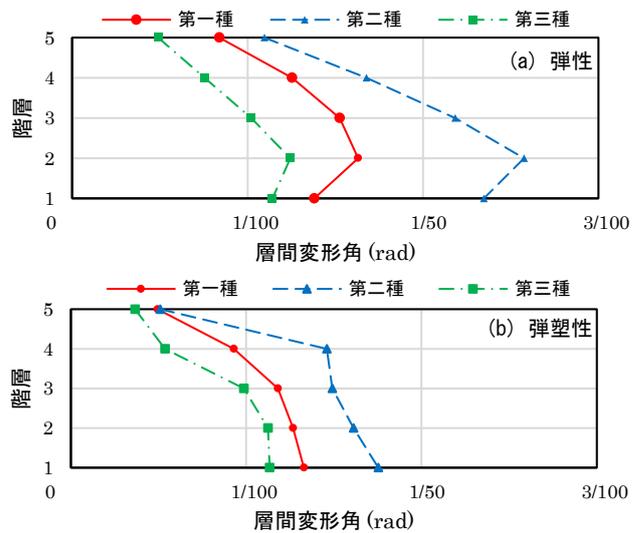


図 9 解析結果 最大層間変形角

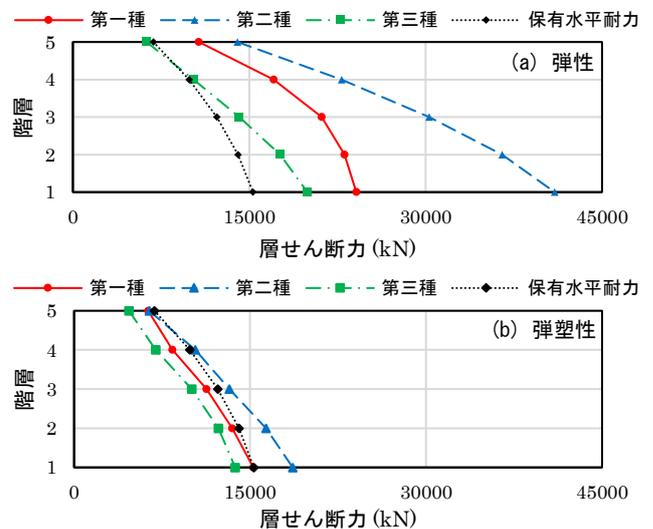


図 10 解析結果 最大層せん断力

設計事例集に記載されている建物周期 0.940 s で地表面での加速度応答スペクトルをみると、第二種、第一種、第三種の順に大きな値となっている。

復元力特性が弾塑性の場合、建築物の塑性化により建物周期が応答スペクトルと対応しないことがある。弾性的場合に第二種、第一種、第三種の順となっていることから、弾塑性の場合も同じような傾向があると推測し、各応答値が入力地震波の大きさの順と異なり、第二種が最も大きくなったと考えられる。

入力地震波3種類とも加速度応答スペクトルは同じ傾向にあったため、図 11 に八戸 EW 位相の地表面での加速度応答スペクトルを示す。

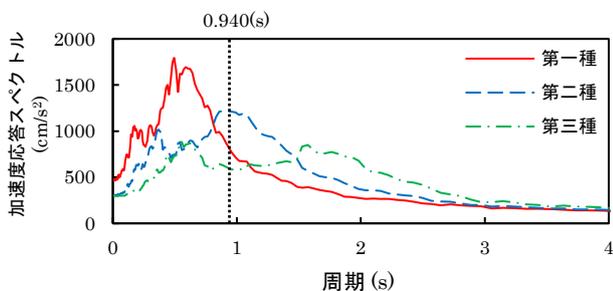


図 11 八戸 EW 位相 加速度応答スペクトル

4. おわりに

本研究では、地盤種別 3 種類を想定した表層地盤による地震動増幅特性の違いを明らかにし、表層地盤により増幅した地震波が建物にもたらす影響を検討した。得られた知見を以下に示す。

表層地盤による地震動増幅特性を以下に示す。表層地盤のせん断歪み依存性を非線形とした場合、第一種、第二種、第三種の順で増幅が大きくなった。せん断歪み依存性によるエネルギーの減衰が起こり、地震波の増幅を抑えたことが分かった。

5 階建て鋼構造建物の復元力特性が弾性的場合、弾塑性の場合、どちらの場合も第二種、第一種、第三種の順に最大層間変形角および最大層せん断力の応答値は大きくなった。弾性と弾塑性の場合を比べると、弾塑性の場合の方が各最大応答値は小さくなっているため、建築物の塑性化によるエネルギーの減衰が

起こり、地震によってかかる力と変形を抑えたことが分かった。

本研究では、地盤種別 3 種類の表層地盤の地震動増幅特性を簡易に再現し、上部構造への影響を確認することができた。今後の展望として、実際の観測データを基にした表層地盤モデルを作成し、簡易に再現した地盤種別 3 種類との地震動増幅特性の比較と、建物モデルの解析事例を増やし、建物への影響について検討していく。

謝辞

本研究の一部は、公益財団法人ひょうご震災記念 21 世紀研究機構「演繹と帰納の両面からのアプローチによる減災都市に向けた革新的建築設計法」(代表：永野康行)からの助成を受けたものである。解析にはユニオンシステム株式会社より導入している「研究室パック」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) 清水亮、前田寿朗：2007 年能登半島地震における穴水町の建物被害の集中と表層地盤の構造、日本建築学会構造系論文集、第 75 巻、No. 648、pp. 269-277、2010. 2
- 2) 時松孝次、新井洋、関口徹：2004 年新潟県中越地震時に表層地盤の非線形振動増幅特性が小千谷の木造住宅被害に与えた影響、日本建築学会構造系論文集、No. 620、pp. 35-42、2007.10
- 3) ユニオンシステム株式会社：Software library SS21 / ShakePRO-L 解説書、ShakePROL.pdf
- 4) ユニオンシステム株式会社：Software library SS21 / DynamicPRO 解説書、dynpro.pdf
- 5) 官報、建設省告示第 1461 号、2000
- 6) 官報、建設省告示第 1793 号、1980
- 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 兵庫県立大学環境人間学部環境人間学科 准教授・博士(工学)

*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)

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

Asoss. Prof., Sch. Hum. Sci. and Env., Univ. Hyogo, Dr. Eng

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