傾斜した支持地盤に立地する建物の入力地震動評価

勝 二 理 智 藤 森 健 史

Evaluation of the Input Ground Motion for a Building Located on an Inclined Bearing Layer

Michito Shoji Takeshi Fujimori

Abstract

It is important to consider the seismic motion amplification caused by an inclined bearing layer. Therefore, the input ground motion for a building located on an inclined bearing layer was examined. The major findings obtained are summarized as follows: i) The profiles can be classified only by the shear wave velocity of the surface layer, regardless of the inclined condition. ii) The seismic load profiles are built based on the sensitivity analyses under the actual site condition. Using these profiles, it is possible to rapidly obtain the amplification characteristics from the conventional input ground motion by performing one-dimensional analyses. iii) It is confirmed by actual design analyses that the profiles are effective for evaluating seismic motion amplification, without finite element method analyses, when the embedment of the foundation is shallow.

概 要

杭支持層が傾斜した埋積谷に立地する杭基礎建物では、耐震設計において、地震荷重への埋積谷の影響を考慮する必要がある。そこで、埋積谷による地震荷重の割増し度合いや、杭と地盤との相互作用による入力低減を 簡易に評価することを目的として、実際の埋積谷に対応した感度解析に基づき、地震荷重特性図を策定した。得られた知見を以下に示す。1)特性図は、支持地盤の傾斜形状や深さによらず、表層地盤のせん断波速度のみで埋 積谷の型を分類できる。2)策定した地震荷重特性図を用いれば、平行成層を仮定した1次元解析に基づく従来の 入力動に対する、埋積谷増幅特性を迅速に把握できる。3)埋積谷に建つ実建物に適用した結果、基礎の埋込みが 浅ければ、FEMを用いなくても、埋積谷による地震荷重の増幅・低減を簡易に評価可能である。

1. はじめに

建物の設計用入力地震動の評価にあたっては、表層地 盤による増幅特性を考慮する必要がある。一般には、せ ん断波速度が400m/s以上となる地層を工学的基盤(ここ では杭の支持地盤とする)として定め、地盤は平行・成層 であると考えて、地盤増幅を考慮した1次元解析を行う。 実際には、支持地盤がまったく傾斜していない場合は稀 であることから、傾斜角が5度以下であれば前記の1次元 解析を適用し、5度を超える場合はその影響を考慮する必 要がある、との方針が国の基準解説書¹⁾で示されている。

一般的に,支持地盤の傾斜(埋積谷地形)を考慮して入 力動を評価するためには,有限要素法(FEM)など高度な 解析が必要となる。昨今,建物規模の増大に伴いFEM解 析モデルも大規模化しつつあり,要する手間や時間も増 加する傾向にある。一方で,埋積谷地形を考慮した入力 動の特性によっては地震時の建物応答への影響が小さく, 高度な解析を必要としないと考えられる場合もある。し かし,実際に詳細な計算を行わない限り,その入力動特 性を予測できない現状にある。

そこで,設計の初期段階における埋積谷の影響による 地震荷重の割増し度合いの把握,およびFEM等による詳 細検討の要否判断の迅速化を目的として,実際の埋積谷 の条件に即したFEMを用いた感度解析に基づいた地震 荷重特性図を策定する。さらに,遠心実験により妥当性 を検証した同図を設計事例に試行することで,その適用 範囲について検討する。

2. 埋積谷地形を考慮したFEM感度解析方法

支持地盤の傾斜に伴う入力地震動の増幅度合いが杭基 礎に及ぼす影響を検討するために、Fig.1に示す支持地盤 の深さ、幅、傾斜角をパラメータとした2次元FEM解析を 行った。その支持地盤の傾斜条件の設定にあたっては、 日本建築学会の調査結果²⁾、建物の地震観測に関する既 往の文献3)~5)、実際の設計事例を参考にした。支持地盤 が浅いと杭の代わりにラップルコンクリートを採用する 場合が多いこと、傾斜が5度以下であれば影響は小さいこ と¹⁾も考慮して、解析検討の範囲を深さ10~40m、幅 25~100m、傾斜角6~21度とした。また、支持地盤が一方 向に傾斜するケース(片傾斜)と、両方向に傾斜するケー ス(両傾斜)の2つを検討している。なお、杭基礎幅の範囲 内で傾斜するようモデル化したため、支持地盤が深い場 合は傾斜角が大きいモデルのみとなっている。

代表的な解析モデルをFig.2に示す。地盤は表層地盤と 支持地盤の2層構成であり、ソリッド要素でモデル化した。 地盤物性をTable1に示す。表層地盤のせん断波速度につ いては、深さ方向に拘束圧依存性を考慮し、全深度の平 均が100,150,200m/sとなるよう設定した。動的変形特性 (歪依存曲線)は修正R-Oモデル(式(1)~(4))で表現して



(b) 両傾斜タイプ Fig. 2 傾斜考慮FEM解析モデル(深さ20m, 傾斜角21度) Finite Element Models of Inclined Bearing Layer

おり,設定し	したパラメータはTable 1の通り	である ⁶⁾ 。
骨格曲線	$\gamma = \frac{\tau}{G_0} \left(1 + \alpha \tau ^{\beta} \right)$	(1)
履歴曲線	$\frac{\gamma \pm \gamma_0}{2} = \frac{\tau \pm \tau_0}{2G_0} \left(1 + \alpha \left \frac{\tau \pm \tau_0}{2} \right \right)$	$\binom{\beta}{2}$ (2)
パラメータ	$\alpha = \left(\frac{2}{2}\right)^{\beta}$	(3)

パラメータ
$$\beta = \frac{2\pi h_{max}}{2 - \pi h_{max}}$$
(4)

ここで、 γ :せん断歪、 τ :せん断応力、 G_0 :せん断弾性 係数、 γ_0, τ_0 :履歴の折返し点のせん断歪・せん断応力、 $\gamma_{0.5}$:基準歪($G/G_0=0.5$ 時)、 h_{max} :最大減衰定数である。

杭基礎は梁要素でモデル化した。100m×100mの基礎版 に、10m間隔で11×11=121本の場所打ち杭が配置されてい ると想定した。基礎版は剛床とした。杭は直径2mで支持 地盤に1m根入れさせ、弾性係数は2.57×10⁷kN/m²、単位体 積重量は24kN/m³、ポアソン比は0.2とした。

Fig. 3に示す検討用地震動には、平成12年建設省告示 1461号(平成13年3月30日改正:国土交通省告示第388号) 第四号イに定められた、解放工学的基盤における加速度 応答スペクトルに適合する模擬地震波を用いた。模擬地 震波の位相特性は乱数位相とした。

解析の領域幅について,水平方向には杭基礎幅の3倍 (300m),鉛直方向には杭長+数mとした。メッシュ幅に ついて,水平方向・鉛直方向ともに1mとした。境界条件 について,側方はローラー,底面は粘性境界を設定した。



Table 1 地盤物性

3. 埋積谷地形を考慮したFEM感度解析結果

3.1 応答加速度波形とスペクトル

埋積谷地形を考慮したFEM解析で求めた,杭基礎中心 での応答加速度波形とその応答スペクトルをFig.4, Fig.5 に示す。比較のため,対象地盤の範囲で支持地盤が最も 深い地点で実施した,1次元解析による結果も併せて示す。

1次元解析において,表層地盤のせん断波速度Vsが大 きくなるにつれて,応答スペクトルの一次ピーク周期が 短周期側に移行することを確認できる(順に1.0,0.6,0.4 秒)。埋積谷FEM解析でも同様であるが,その周期は1次 元解析よりさらに短くなる(順に0.7,0.4,0.3秒)。これは, 表層が厚い部分(1次元解析に相当)と薄い部分(支持地盤 が浅くなる方)の応答が合わさったためであり,支持地盤 の傾斜の影響を確認できる。また,剛床設定のため,地 表での杭基礎応答は位置によらず同等である。

3.2 1次元解析に対する応答スペクトルの振幅比

対象地盤の範囲で支持地盤が最も深い地点において, 1次元解析により入力地震動を評価するのが一般的であ る。そこで,支持地盤の傾斜による加速度応答の増幅度 合いについて分析するため,埋積谷FEM解析と1次元解 析との応答スペクトル比を求めた(Fig.6)。算出した応答 スペクトル比について,地形のタイプ(片傾斜,両傾斜), 表層地盤のせん断波速度Vs(100, 150, 200m/s)で分類し, Fig. 7, Fig. 8に示す。

傾斜角で比較すると、どの角度の場合でも振幅の増減 が見られ、1次元解析との差を確認できる。また6度の場 合は、ほかの角度と比較して、振幅比の大きさやその周 期がやや異なる。地形のタイプで比較すると、両傾斜の 振幅比の方が若干大きいが、その周期や形状は片傾斜の 場合とほとんど変わらない。表層地盤のVsが大きくなる と、振幅比の変動の幅は小さくなり、山谷の一次ピーク 周期は短周期化する。支持地盤が深くなると、全体に長 周期側に移行する。

3.3 埋積谷の地震荷重特性図

応答の振幅比について、地形のタイプ(片傾斜,両傾斜) による有意な差は確認できなかった。同様に、傾斜が緩 いケース(傾斜角6度)を除いて、傾斜角による差も無かっ た。一方で、表層地盤のVsと支持地盤深さによっては、 振幅比の大きさや形状、山谷の周期帯が異なっていた。 そこで、支持地盤深さによらない結果を導くため、振幅 比の図横軸の周期を、1次元解析における一次ピーク周期 (地盤の一次周期)で除して基準化することで、地震荷重 特性図を策定した(Fig. 9)。

地盤周期で基準化することにより、振幅比の大きさや 形状、山谷の周期帯が概ね一致することを確認できる。 表層地盤のVsで比較すると、山谷の周期はそれほど変わ らないが、振幅比の大きさや変動の幅は異なる。また、 表層Vs=100m/sのケースで、短周期側の振幅比がばらつ くのは、非線形化が進み発散しやすいという解析上の問 題である。実設計解析時には、高振動数域の発散を抑え るため、剛性比例型の微小な減衰を追加して対応する。

遠心振動台実験の再現性を担保した数値解 析による検証

4.1 実験と解析の概要

3章で策定した埋積谷の地震荷重特性図について,遠心 振動台実験の再現性を担保した数値解析により,妥当性 を検証する。対象としたのは,傾斜した基盤に支持され た杭基礎建物模型を用いて,50Gの遠心力場で実施した 振動台実験である。3次元FEM解析モデルを用いて,実験 結果を良好に再現可能であることを確認している⁷⁰。実 験では上部構造付きの模型と剛土槽を用いているため,



Fig. 5 加速度応答スペクトル(片傾斜, 深さ20m, 傾斜角21度) Acceleration Response Spectra





上部構造の振動特性や土槽境界面からの反射の影響が含まれる。そこで、FEMを用いた特性図の検証には、上部構造を除去した杭基礎を対象に、地盤領域を拡張することで境界条件の影響も取り除いた解析モデルを用いた(Fig. 10)。解析諸元をTable 2に示す。

4.2 検証結果

告示規定の極稀波(レベル2)を入力し,杭基礎中央での 加速度応答と,表層地盤が厚い地点(長さ15mの杭位置) における1次元応答とを比較した。応答加速度波形とその 応答スペクトルをFig.11,Fig.12に示す。FEM解析の応答 スペクトルの一次ピーク周期は0.4秒で,1次元解析(0.6 秒)に比べ短周期化している。それに伴い,1次元解析で 増幅する0.6秒付近の応答は大きく下がるが,0.4秒付近が 新たに増幅するようになる。



(b) 表層Vs=150m/s Fig. 9 埋積谷の地震荷重特性図 Seismic Load Profile of Inclined Bearing Layer



Fig. 10 遠心実験FEMモデル Centrifuge Model Test's FEM

Table	2	遠心	実験FEM解析諸元
		EEM	Droportion

rew rioperties						
杭長	6, 9, 12, 15 m					
杭径	PHC1000 ф相当					
杭本数	8 本					
平面形状	13.5×22.0 m					
平均Vs	140 m/s					
Vs	520 m/s					
傾斜角	25°					
加振波	告示極稀波, 乱数位相					
加振方向	傾斜直交方向					
	 杭長 杭径 杭本数 平面形状 平均Vs Vs (項斜角) 加振波 加振方向 					

続いて、それらの応答スペクトル比を用いて、3章で 策定した地震荷重特性図の検証を行う。表層地盤のせん 断波速度Vsが近い、Fig.9(b)の特性図を検証対象とした。 重ね合わせた図をFig.13に示す。ここで、遠心実験FEM の周期は、1次元解析の地盤周期で基準化している。特性 図では、ピークの振幅比をやや小さめに評価しているが、 全体の形状や周期帯は良く対応していることから、同図 による増幅特性評価の妥当性を確認した。

5. 実設計解析への適用

5.1 実設計解析の概要

実設計解析事例をTable 3に示す。3次元FEM解析により設計用入力地震動を評価しているが、3章の感度解析と 比較して基礎や地盤の条件はより複雑である。本章では、 策定した地震荷重特性図をこの事例に試行することで、 同図の適用範囲について検討する。

Fig. 14の事例1⁸では,表層地盤の平均せん断波速度Vs は300m/sであり,やや値は大きいが,Fig. 9(c)の特性図 の適用事例とした。杭基礎の免震建物で,一部は直接基 礎である。建物基礎平面はNS方向94m,EW方向111mで ある。杭は場所打ち杭(杭径2500mm,杭長6~27m)である。 表層地盤は盛土,支持地盤は風化花崗岩である。

Fig. 15の事例2⁹⁾では,表層地盤の平均Vsは150m/sであり,Fig. 9(b)の特性図の適用事例とした。杭基礎の免震 建物で,一部に地中連続壁が設置されている。建物基礎











Fig. 13 遠心実験FEM解析による地震荷重特性図の検証 Examination of Seismic Load Profile

Table 3 FEM解析による入力動評価の事例

Example of Evaluating input Motion by FEM Analysis							
No.	基礎形式	埋込み	基礎形状	表層地盤	支持地盤	支持地盤	
			NS, EW	のVs	のVs	の傾斜角	
1	杭基礎	2m	94, 111m	300m/s(平均)	750m/s	平均29°	
	一部直接			210m/s(等価)			
2	杭基礎	16m	60, 31m	150m/s(平均)	600m/s	平均18°	
	一部連壁			110m/s(等価)			

平面はNS方向60m, EW方向31mである。杭は場所打ち杭 (杭径1200~1800mm, 杭長6~24m)である。表層地盤はシ ルト,支持地盤は土丹である。両事例とも,告示規定の 極稀波(レベル2)を入力しており,事例1では八戸NS位相, 事例2では乱数位相とした。

Table 3中の値について、せん断波速度Vsが400m/s以上



となる層以深を支持地盤,それ以浅を表層地盤と定義している。表層地盤の等価Vsは,地震時の剛性低下(0.7倍) と層厚の重み付けを考慮して概算した値であり,前述した特性図の選定と,基準化周期の算定に用いる。

5.2 適用結果

FEM解析を行わず,支持地盤が最も深い地点における 1次元解析により設計用入力地震波を評価する場合,地表 から支持地盤までをモデル化対象とするが,基礎の埋込 み深さによって,入力波に採用する応答の深度が異なる。 基礎の埋込みが浅い場合,地表と基礎底で表層地盤増幅 の差は小さいとして,地表レベルでの応答波を入力波と して採用することが多い。それに対し,埋込みが深い場



合は,基礎底レベルでの応答波を採用することが多い。 そこで,実設計FEM解析による杭基礎中央での加速度 応答について,埋込みの浅い事例1は地表,埋込みの深い

事例2は基礎底での1次元応答波と比較する。応答加速度

波形とその応答スペクトルをFig. 16, Fig. 17に示す。

事例1について,FEM解析の応答スペクトルの一次ピ ーク周期(0.27秒)は1次元解析(0.38秒)に比べ短周期化し, 応答のピーク値も大きく下がる。また、1次元解析の一次 ピーク周期は、等価Vsと表層地盤厚さH(地表から支持地 盤までの値)より求まる地盤周期T(=4H/Vs)と概ね一致 する。

事例2について、基礎底レベルで評価した1次元解析の 応答スペクトルは、事例1とは様相が異なり、0.6秒前後 の周期帯で大きく窪む形状となる。これは、地表での応 答には支持地盤から地表までの地盤増幅が含まれるが、 基礎底で応答を評価すると、そのうち基礎底から地表ま での地盤増幅分が除かれるためである。また、応答のピ ーク値についても、事例1とは異なり、FEM解析の応答値 は1次元応答より大きくなる。

続いて,表層の等価Vsに基づき,事例1にFig.9(c),事 例2にFig.9(b)の特性図を適用する。前述したFEM解析と 1次元解析の応答スペクトル比を重ね合わせ,Fig.18に示 す。ここで,基準化のための地盤周期の算定に用いる表 層地盤厚さは,事例1では地表から支持地盤までの値,事 例2では基礎底から支持地盤までの値とした。

埋込みが浅い事例1では対応が良く,特性図の有効性を 確認できる。ピーク周期がやや短周期側に外れているの は、一部が直接基礎であり支持地盤の影響をより受けた ためである。それを見込んで、基準化に用いる地盤周期 を小さめに評価すれば、実用上は問題ないと考えられる。

一方,埋込みの深い事例2では,振幅比の大きさ・周期 帯ともに外れている。これは前述した,応答スペクトル 比の分母である1次元解析の基礎底レベルでの応答特性 によるもので,埋込みが無い条件で策定した特性図との 整合性が良くない結果となっている。

以上より,策定した埋積谷の地震荷重特性図は,埋込 みが無い,もしくは埋込みが浅い場合であれば,十分適 用可能と考えられる。

6. まとめ

杭支持層が傾斜した埋積谷に立地する杭基礎建物では, 耐震設計において,地震荷重への埋積谷の影響を考慮す る必要がある。そこで,埋積谷による地震荷重の割増し 度合いや,杭と地盤との相互作用による入力低減を簡易 に評価することを目的として,実際の埋積谷に対応した 感度解析に基づき,地震荷重特性図を策定した。

得られた知見を以下に示す。

- 特性図は、支持地盤の傾斜形状や深さによらず、表層 地盤のせん断波速度のみで埋積谷の型を分類できる。
- 2)策定した地震荷重特性図を用いれば、平行成層を仮定した1次元解析に基づく従来の入力動に対する、埋積 谷増幅特性を迅速に把握できる。
- 3) 埋積谷に建つ実建物に適用した結果,基礎の埋込みが 浅ければ,FEMを用いなくても,埋積谷による地震荷 重の増幅・低減を簡易に評価可能であると確認した。





(b) 事例2 Fig. 18 地震荷重特性図の実設計解析への適用 Application of Seismic Load Profile

参考文献

- 建築物の構造関係技術基準解説書編集委員会:2015 年版 建築物の構造関係技術基準解説書(2016年追 補収録版),2017.7
- 日本建築学会:建築基礎構造設計のための地盤評価・ Q&A, 2016.4
- 3) 袋野健一,日下部馨:傾斜基盤に異種基礎で支持された建築構造物のねじれ振動,日本建築学会近畿支部研究報告集,pp.77-80,1997.5
- 高森剛,大場新太郎,飛田喜則:長さの異なる杭基 礎で支持された免震建物の地震応答性状,日本建築 学会近畿支部研究報告集,pp.45-48,2001.5
- 5) 宮原直樹, 永野正行, 北村春幸, 佐藤利昭, 鈴木賢 人, 飛田喜則: 2011年東北地方太平洋沖地震時の観 測記録に基づく傾斜基盤構造に建つ免震建物の地震 応答特性 その1,2, 日本建築学会学術講演梗概集, pp. 587-590, 2016.8
- 6) 日本建築学会:建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計,2006
- 小島宏章,勝二理智,藤森健史:傾斜地盤に建つ杭 基礎建物の遠心振動台実験(その1~6),日本建築学 会大会学術講演梗概集,構造I,2017.7~2019.7

- 藤森健史,勝二理智,萩原由訓,大野茂,貞弘雅晴: 埋積谷に建つ杭基礎建物の入力地震動評価,日本建 築学会大会学術講演梗概集,構造I,pp.801-802, 2017.7
- 9) 岡崎由佳,勝二理智,藤森健史,鈴木直子,浅岡泰 彦:埋積谷に建つ杭基礎建物の耐震性に関する研究 -地震時挙動特性について-,日本建築学会大会学 術講演梗概集,構造 I,pp.451-452,2016.7