

氏名（本籍）	とび た よし のり 飛 田 喜 則（京都府）
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	甲第 1052 号
学位授与の日付	2020 年 3 月 17 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	傾斜基盤を有する地盤上に建つ免震建物の実測に基づく地震時挙動および杭応力に関する研究

論文審査委員	（主査）教授 永野 正行
	教授 衣笠 秀行 教授 兼松 学
	教授 木村 吉郎 教授 伊藤 拓海

論文内容の要旨

多くの建築物が建つ平野部、その周辺の山地との境界付近では、支持層となる基盤が局所的に傾斜するなどの不整形地盤が多く存在し、それが原因と考えられる地震被害がいくつか報告されている。たとえば、1995 年兵庫県南部地震時には、山地と平野部の境界付近で基盤の不整形性に起因して表層地盤の地震動が増幅し、「震災の帯」と言われる被害集中域が存在した。2011 年東北地方太平洋沖地震時では、同一敷地内に同じ形状の建物が複数あるうちの 1 棟だけ被害を受けた例があり、解析などによって不整形地盤が原因であると推測された。このように不整形な基盤形状が表層の地震動特性に寄与し建物の地震被害に影響を及ぼしている。傾斜基盤を有する地盤の地震動は、傾斜層の影響により反射・屈折を繰り返す過程で様々な波動が生成されるため、水平成層地盤に比べて複雑な挙動を示す。建物が建設される敷地内でも傾斜基盤のような不整形地盤が存在するケースは多く見られ、それらの建物の基礎には直接基礎と杭基礎等を併用した異種基礎形式が採用される場合がある。このような異種基礎では、地震動の複雑さに加えて、層厚に応じて杭の変形量が異なること、地盤の境界付近にある直接基礎と杭に作用する水平力の分担率が明確でないことなどから、これらの基礎の設計には注意する必要があることが指摘されている。日本建築学会の基礎構造設計指針などでは異種基礎の使用をなるべく避けて計画することが望ま

しく、詳細な解析手法によって検討する必要があるとしているが、その解析方法等は確立していない。また、設計に用いられる入力地震動は、一般に表層地盤を水平成層地盤と仮定した地盤の地震応答解析によって評価されることが多く、傾斜基盤の影響を建物の構造設計に取り入れることは困難である。

傾斜基盤上の地盤の地震動特性について有限要素法(FEM)などによる解析検討が行なわれている。表層地盤を水平成層地盤と仮定した地盤震動に比べて、周期特性などが短周期側にシフトすること、基礎位置によって振幅差が生じることが示され、それらの結果に基づき簡易評価式などが提案されてきている。しかし、実際の地震の強震記録によってその影響を評価した例は少ない。免震建物については、兵庫県南部地震で応答低減が実証され免震効果が認められて以来、今日に至るまで多く建設されている。しかし、傾斜基盤を有する地盤上に建つ免震建物で、実際に地震動の観測を実施し、得られた強震記録を分析している事例は皆無である。

本研究の目的は、傾斜基盤を有する地盤上に建つ免震建物の強震記録に基づき、その建物の挙動を分析すること、さらに上部構造、免震層、杭、地盤を一体とした地震応答解析モデルを構築し、強震記録を再現するとともに、観測では得られていない上部構造の応答や基礎・杭の応力状態を把握し、耐震設計に資する知見を提供することである。

本研究で対象とする建物は、支持層が傾斜しているため、直接基礎と長さが異なる杭を併用した異種基礎によって支持され、かつ比較的長大な平面形である免震建物である。この建物では2000年から地震観測を行い130以上の地震動の記録を得ている。本研究では、まず観測した強震記録を分析することにより、傾斜基盤上での地盤や免震建物の挙動やその特徴などを明らかにする。次に、地盤から上部構造をモデル化し、これによって強震記録を再現できることを示し、さらに観測されていない部分の応答や地盤内や杭体の応力などを検討する。

本論文は6章で構成している。第1章は、本研究の目的と全体の構成・概要を示し、既往文献により傾斜基盤または異種基礎の地震応答に関する知見を整理する。第2章は、地震観測を実施している免震建物の概要やその地盤構造、杭を含む基礎構造および地震観測の概要を示す。

第3章は、対象建物の地震観測で得られた記録を分析する。分析の結果、基礎底版の地震動は、傾斜基盤によって表層地盤深さが深くなるに従って最大加速度が大きくなること、また到達時間に時間差が生じていることを示し、これらによって基礎底版にねじれ振動を励起させることなど基本的性質を明らかにした。次に、免震層を介した1階床の卓越周期

が基礎底版の加速度が大きくなるに従い長周期化していることを示し、その結果から免震層の水平剛性の非線形性を確認し、水平せん断歪と剛性の関係を H・D モデルによって評価した。また、高減衰積層ゴムが経験したせん断歪に応じてその剛性が低下する最大経験ひずみ依存性を実際の強震記録の分析により明らかにした。傾斜基盤によって各部の振幅の増加率の違いや時間差によって基礎部に振れ震動が励起されるが、1 階床部のねじれ振動は、免震層を介することで緩和され比較的並進的な挙動となること、1 階床部での振れ振動が基礎部の加速度が大きくなるほど低減効果が顕著であり、振れ応答率が基礎部に比べて半減することを示した。

第 4 章は、本建物の地盤、杭、基礎、免震層および上部構造による 3 次元フレームモデル、また地盤の 2 次元 FEM モデルを構築し、それらによって強震記録を再現する手法を提案している。最初に、3 次元フレームモデルの概要を説明し、特に設計式では表現していない免震層の微小変形時の剛性を強震記録に基づいて評価し、それをモデル化する方法について述べている。次に、傾斜地盤を 2 次元 FEM モデルとした解析モデルによって、強震記録を基にして地盤内各所の地震動を推定する手法を示した。その推定波を入力地震動として 3 次元フレームモデルに多点入力した地震応答解析によって、基礎部と 1 階床部の強震記録を概ね良好に再現することができることを示すとともに、地震観測では得られていない上部構造の応答や杭の応力に傾斜基盤が及ぼす影響を検討した。その結果、杭の変位分布は、傾斜基盤によって層厚が厚くなるとともに大きくなるが、傾斜基盤の傾斜と直交方向と平行方向では直接基礎および基礎底版による杭頭変位の拘束効果が異なるため、それらが杭頭変位や杭応力に影響を及ぼしていることがわかった。また、傾斜基盤を有する地盤の杭の応力は、各杭位置での 1 次元モデルによる地盤応答結果を用いた方が 2 次元モデルに比べて大きくなり、杭の設計としては安全側となるが、やや過大評価となること、その層厚によって異なる地震動の影響を受けるため、詳細な検討には各杭位置での地盤変位など空間的な変動を考慮する必要があることを明らかにした。

第 5 章は、構築した解析モデルに基づき、入力地震動に単純なリッカー波を用いることで傾斜基盤を有する地盤の地震波の伝播特性、強震記録だけでは評価が難しい地盤の挙動や杭基礎の応力状態を詳細に検討した。その結果、傾斜基盤を有する地盤の表層で観測される地震動の振幅は、1 次元モデルとの比較などによって検討した結果、基盤傾斜部では小さくなるが平坦となる付近では 1.2~1.4 倍大きくなり、これが観測記録の東端部において地震動の振幅が増加する傾向と一致することを示した。傾斜基盤が存在することによって地盤内の加速度分布や変位分布は、基盤へ入射する地震動（入射波）の周期によって異

なり、それらが各杭位置で地盤の地震波に位相差や変位差を生じさせ、それが杭の応力に影響を与えることを明らかにした。

第6章は、本研究で得られた知見についてまとめている。

論文審査の結果の要旨

本審査委員会では、傾斜基盤を有する地盤上に建つ免震建物の実測に基づく地震時挙動および杭応力に関する研究について審査を行った。多くの建築物が建つ平野部、その周辺の山地との境界付近では、支持層となる基盤が局所的に傾斜するなどの不整形地盤が多く存在し、不整形な基盤形状が表層の地震動特性に寄与することで建物の地震応答に影響を及ぼし、それが原因と考えられる地震被害がいくつか報告されている。建物が建設される敷地内において傾斜基盤のような不整形地盤が存在は多く、それらの建物の基礎には直接基礎と杭基礎等を併用した異種基礎形式が採用される。異種基礎では、地震動の複雑さに加えて、層厚に応じて杭の変形量が異なること、地盤の境界付近にある直接基礎と杭に作用する水平力の分担率が明確でないことなどから、これらの基礎の設計に注意する必要があることが指摘されている。日本建築学会の基礎構造設計指針などでは異種基礎の使用をなるべく避けて計画することが望ましく、詳細な解析手法によって検討する必要があるとしていたが、その解析方法等は確立していない。また、設計に用いられる入力地震動は、一般に表層地盤を水平成層地盤と仮定した1次元モデルによる地盤の地震応答解析によって評価されており、傾斜基盤の影響を建物や杭の構造設計に取り入れることは困難である。そのため、有限要素法(FEM)などによる解析検討が行なわれているが、実際に観測された強震記録によってその影響を評価した例は少ない。さらに、免震建物は、兵庫県南部地震で応答低減が実証されて多く建設されているが、傾斜基盤を有する地盤上に建つ免震建物で、実際に地震動の観測を実施し、得られた強震記録を分析している事例は皆無である。

本研究の目的は、傾斜基盤を有する地盤上に建つ免震建物で得られた観測地震動に基づき、その建物の挙動を分析すること、さらに上部構造、免震層、杭、地盤を一体とした地震応答解析モデルを構築し、観測地震動を再現するとともに、観測では得られていない上部構造の応答や基礎・杭の応力状態を把握し、耐震設計に資する知見を提供することである。また、従来行われている1次元モデルとの違いについて検討し、それらの問題点と傾斜基盤を考慮できる2次元モデルの合理性について示している。

本論文は6章で構成されている。

第1章は、本研究の目的と全体の構成・概要を示し、既往文献により傾斜基盤または異種基礎の地震応答に関する既往の知見を整理している。

第2章は、地震観測を実施している免震建物やその地盤構造、杭を含む基礎構造およ

び地震観測システムについて説明している。

第3章は、対象建物の地震観測で得られた観測地震動を分析している。傾斜基盤によって表層地盤深さが深くなるに従って振動数が低くなり、最大加速度が増幅すること、また到達時間に時間差が生じることを示し、これらによって基礎底版にねじれ振動が励起することなど基本的性質を明らかにした。

第4章は、傾斜基盤を考慮した2次元FEMモデル、本建物の地盤、杭、基礎、免震層および上部構造による3次元フレームモデルを構築し、それらによって観測地震動を再現する手法を提案している。地震応答解析によって、基礎部と1階床部の観測地震動を概ね良好に再現することができることを示すとともに、地震観測では得られていない上部構造の応答や杭の応力が推定できることを示した。

第5章は、構築した解析モデルの入力地震動に単純なリッカー波を用い、観測地震動による評価が難しい、傾斜基盤を有する地盤の地震波の伝播特性、地盤の挙動や杭基礎の応力状態を詳細に検討した。また、傾斜基盤を有する地盤の杭の応力は、各杭位置での1次元モデルによる地盤応答結果を用いた方が2次元傾斜モデルに比べて大きくなり、杭の設計としては安全側となるが、やや過大評価となること、その層厚によって異なる地震動の影響を受けるため、詳細な検討には各杭位置での地盤変位など空間的な変動を考慮する必要があることを明らかにした。

第6章は、本研究で得られた知見についてまとめている。

本研究で対象とした建物は、支持層が傾斜し直接基礎と長さが異なる杭を併用した異種基礎によって支持され、かつ比較的長大な平面形である免震建物である。この建物で2000年から地震観測を行い130以上の地震動の記録を得ている。傾斜基盤を有する地盤上に建つ免震建物の地震時挙動について、地震記録を多数収集・分析し、3次元モデルによるシミュレーション解析と併せて実測ベースで解明した研究はこれまで皆無であり、得られた知見は極めて貴重なものである。本論文で得られた研究成果は、免震建物だけではなく、傾斜基盤を有する地盤上に建つ建物全般や杭基礎の耐震設計法の構築に大きく貢献するものである。

よって、本論文が博士（工学）の学位論文として十分に価値あるものと認められる。