

2. 博士論文：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

Dynamic Characteristics of a Seismically Isolated Building on Soil with Inclined Bedrock Using Strong Motion Records and an Analysis Model

飛田 喜則*¹

□ 目的

日本国内において、多くの建築物が建つ平野部やその周辺の山地などの境界付近では、基盤が傾斜している不整形地盤が多く存在する。このような傾斜基盤に支持される建築物の基礎構造には、直接基礎と杭基礎等の基礎形式を併用する異種基礎が多く採用される。異種基礎の設計には、層厚に応じて地盤や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に大きな応力が集中すること、杭に作用する水平力の分担率が明確でないことなどの問題点があげられる。また、建築物が平面的に長くなると、各基礎位置での層厚の違いによって地震波の到達時間差によって基礎に鉛直軸周りに回転が生じること、また、それによって上部構造に大きな捩れが生じることも指摘される。一般的に設計に用いられる入力地震動は、表層地盤を水平成層地盤と仮定した地盤応答解析によって評価されているため、それに比べて不整形地盤で観測される地震動は、複雑な挙動を示すこと、周期特性が異なること、基礎位置によって位相差が生じるなどが指摘されている。その精度の良い評価や定量化が困難であるため、これまで有限要素法などによる地震応答解析手法の提案や、それらの結果に基づく簡易評価式や設計法などが提案されている。しかし、それらに実際の地震の観測地震動によってその影響を実証した例は少ない。本研究で対象とする建物（図1）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。本建物において、傾斜基盤の影響を検討するため地震観測を約20年間行ってきた。図2は2005年7月23日に千葉県北西部で発生した地震（M6.0）によって対象建物で観測した加速度波形（基礎部のNS方向）である。図は、基盤層から地盤の表層までの層厚が浅い観測点から次第に深くなる観測点の3か所の地震動である。最初の短周期成分が多い30～33秒付近では差が生じていないが、34秒以降では、層厚が深くなるに従って振幅が大きくなりかつ周期が長くなっている。このように傾斜基盤を有する地盤上で傾斜基盤の特徴的な挙動を捉えた実際の観測地震動が得られた。

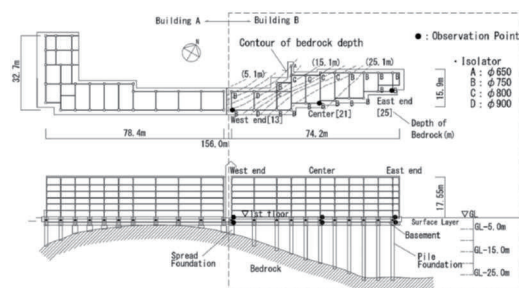


図1 対象建物概要

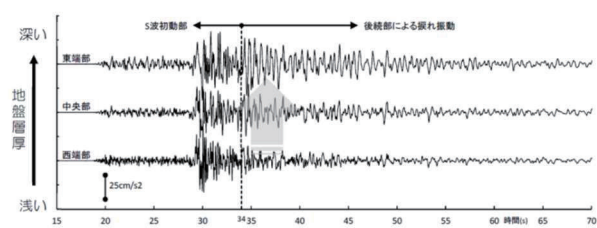


図2 観測された地震波の例

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観測地震動に基づいて、その建物の挙動を分析すること、それらを再現できる傾斜基盤構造を考慮できる地盤の2次元FEMモデル、上部構造-免震層-杭および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、地震観測では得られていない上部構造の応答や基礎・杭の応力状態や要因等を明らかにして、耐震設計に資する知見を得ることである。

□ 概要

本論文では、傾斜基盤を有する地盤上に建ち直接基礎と長さが異なる杭からなる異種基礎によって支持された免震建物を対象に、観測地震動を基にして上部建物、杭変位・応力の地震時の応答を評価する。まず、観測地震動から、傾斜基盤上に建つ基礎底版や上部構造の応答特性の分析をおこなう。次に、地盤のFEM解析モデル、および杭・地盤・建物から構成される3次元フレーム解析モデルを用いて観測地震動をシミュレーションする手法を提案する。それを用いて再現した観測地震動によって、上部構造や杭など観測記録からでは得られない上部構造の応答、地盤内の応答、さらに杭の応力について検討する。

□ 結論

本論文では、傾斜基盤を有する地盤上に建ち直接基礎と長さが異なる杭からなる異種基礎によって支持された免震建物を対象に、観測地震動を基にして上部建物、杭変位・応力の地震時の応答を評価した。第1章および第2章では建物の概要などについて述べている。第3章では、対象建物の地震観測で得られた観測地震動を分析した結果を述べている。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。次に、免震層を介した1階床の応答は、基礎底版の加速度が大きくなるに従って免震層の水平剛性が非線形性を示し長周期化すること、傾斜基盤によって基礎部に揺れ振動が励起されるが、1階床部の揺れ振動が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、基礎部の加速度が大きくなるほど揺れ応答率(図3)が基礎部に比べて半減することを定性的に示した。第4章では、傾斜基盤を考慮した2次元FEMモデルと、本建物の地盤、杭、基礎、免震層および上部構造からなる3次元フレームモデルによって観測地震動を再現する手法を提案している(図4)。2次元FEMモデルによって、観測地震動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。次に、それによる推定波を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階床部の観測地震動を概ね再現でき、また地震観測では得られない上部構造の応答や杭の応力状態を推定できることを示した。これらによって、傾斜基盤にある杭の変位分布や杭応力は、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によって異なることを示した。第5章は、2次元FEMモデルによって、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。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次元モデルに比べて基盤傾斜部では小さくなるが平坦となる付近では大きくなることを示した。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、さらに杭の応力に影響を与えることを示した。また、傾斜基盤を有する地盤の杭の応力(図5)は、それぞれの杭の長さが異なるため剛性が異なること、地盤の震動特性が異なることによる影響を受け、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過大評価であり、傾斜基盤による拘束効果などを考慮することで詳細な杭や上部構造の応答評価には各杭位置での地盤変位など空間的な変動を考慮できる2次元傾斜モデルが有効であり、合理的な設計をできることを示した。

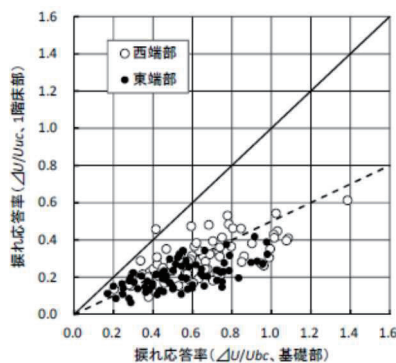


図 3.7.8 基礎部と1階床部の振れ応答率

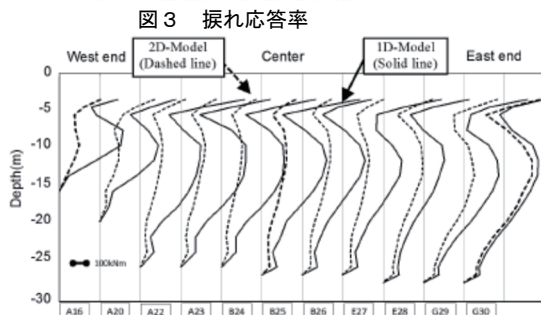


図 5 解析による杭の曲げモーメント比較

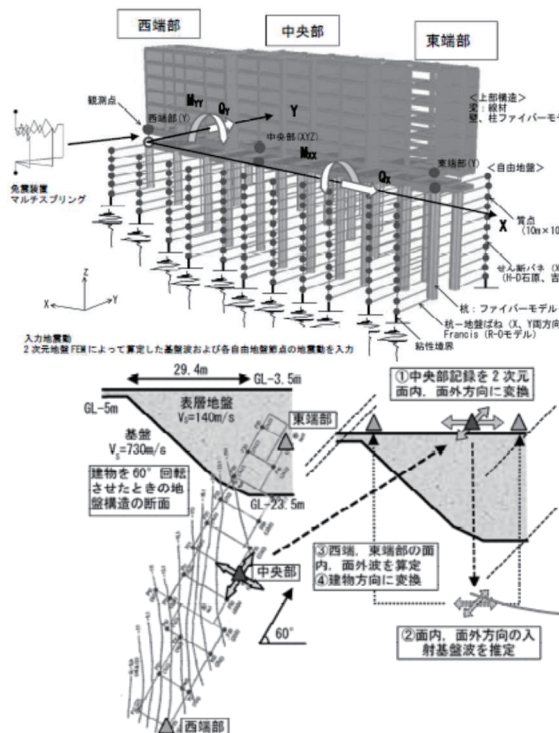


図 4 解析モデル (3次元フレームモデル、2次元FEM)