

# 建設時の微動計測に基づく埋立地盤に立地する 大規模杭基礎構造物の立体的振動挙動に関する研究

名古屋大学大学院 環境学研究科 都市環境学専攻  
博士前期課程2年 福和研究室 奥 祥平

## 1. はじめに

一般に埋立地には、エネルギー施設や工場などの生産施設が多数存在している。地震時にこれらの施設が被害を受け生産活動が停止した場合、社会に極めて大きな影響を与えるため、地震時挙動を把握しておく必要がある。

埋立地などの軟弱地盤においては、表層地盤の増幅によって地震動が大きくなる。近年では、地震の規模や震源位置によっては振幅の大きな表面波が発生することが指摘されている。埋立地に立地する生産施設はほとんどが長大な平面を有する杭基礎構造物であり、基礎は剛体として設計されている。しかし、基礎は必ずしも剛体ではなく、特に表面波によっては変形を伴った挙動を示すと予測される。よって、これら生産施設の地震時応答を評価する上では、地盤振動特性や上部構造の振動性だけでなく、基礎の変形挙動を把握しておく必要がある。

以上から、本研究では埋立地盤に立地する火力発電所を対象に、地盤振動特性、基礎の挙動、建物全体の挙動を把握することを目的とし、実際に計測を行なった。

## 2. 対象建物概要

対象発電所では、発電設備の更新に伴う建て替え工事が行われた。以下に、工事に伴う地盤状況の変化と新設される発電所建屋の構造的特徴を示す。

### 2.1 地盤状況の変化

新設発電所の配置と既往の地盤調査結果を図 2.1 に示す。新設発電所は、深度 60 m に存在する N 値 50 を超える層を工学的基盤としており、杭長を 60 m としている。

対象発電所では、同敷地内での建て替え工事が行われており、既存の発電所建屋の上部構造はすべて解体するものの一部の杭基礎は地中に残置するものとしている。そのため、新設される発電所建屋の一部では旧建屋に使用されていた杭 (=残存杭) が地中に残置されており、地点によっては地盤振動特性が異なる可能性がある。また、新設される発電所建屋の建設範囲ではサンドコンパクションパイル工法による地盤改良工事が実施され、深度 20 m まで砂杭が造成される。その後、新設発電所の杭 (=新杭) が順次打設されていく。地盤改良による砂杭、残存杭、新杭の概要を表 2.1 にまとめる。以上より、新設発電所建屋の建設範囲においては、工事の進捗によって図 2.1 に示すような地盤状況の変化が考えられる。

これらの地盤状況の変化によって、地盤振動特性も変化していくと考えられる。しかし、地盤改良工事や杭の打設が行われるごとに、ボーリングや PS 検層などの精緻な地盤探査を実施するには、多大なコストと労力を要する。本研究では、比較的簡便に得られる地表での常時微動を計測することで、地盤状況の変化による地盤振動特性の違いを明らかにする。

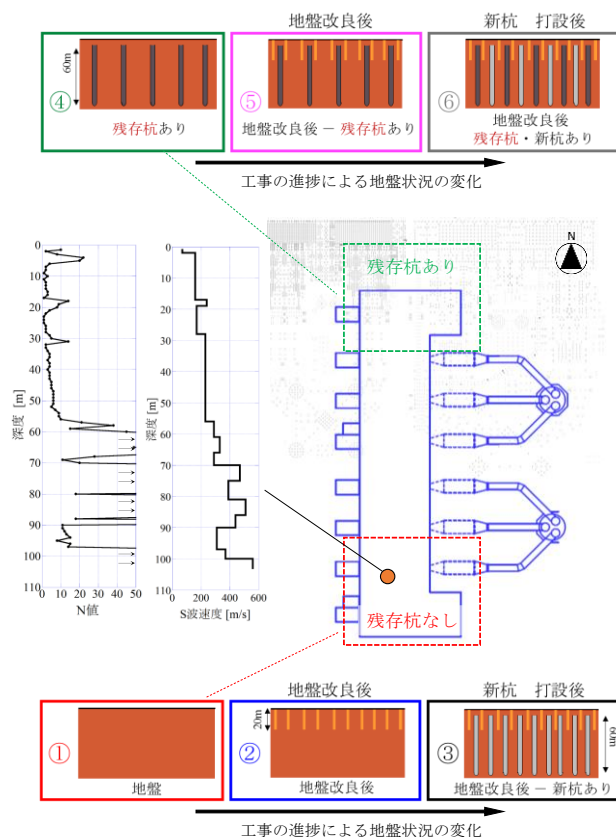


図 2.1 配置図と既往の地盤調査結果、地盤状況の変化

表 2.1 杭の概要

	残存杭	新杭	(砂杭)
杭種類	支持鋼管杭	支持鋼管杭	(地盤改良杭)
杭工法	打撃工法	打撃工法	
杭径	φ800	φ600	φ700
長期支持力	200t/本	180t/本	
杭長	約60m	約60m	約20m
杭間隔	3.5m程度		1.6m程度

### 2.2 新設される発電所建屋の構造的特徴

新設される発電所建屋は南北 290 m、東西 85 m (58 m)、高さ 32.5 m の S 造 3 階建てであり、基礎には厚さ 2.5 m の RC 造マットスラブが採用されている。

建屋内の南北両端部に蒸気タービンを 1 基ずつ、ガスタービンを中央部に 6 基有する。これら計 8 基のタービンは、基礎スラブから立ち上がっている RC 造の架台に据え付けられているため、荷重はすべて基礎に直接かかる。ガスタービンは 2F レベルに、蒸気タービンは 3F レベルに設置されているが、これら RC 造架台の床面と S 造躯体の床面との間にはスリットが設けられている。

1F 平面と、長辺方向の断面図を図 2.2 に示す。本論では蒸気タービンを有する両端部の区画を ST 部、ガスタ

ービンを有する中央部の区画を GT 部と呼称する。ST 部と GT 部では鉄骨の強軸方向が異なるが、区画間にスリットなどは存在せず、躯体全体は一体として建設される。また、GT 部においては南北 216 m×東西 27 m×高さ 18.7m、ST 部においては南北 37 m×東西 84 m×高さ 12.7m の大空間を有する。(図 2.2 色つき部分)

以上から、対象建屋は長大なマットスラブ基礎を有すること、柱の強軸方向が異なること、一部大空間を有することから複雑な立体的振動挙動を示すと考えられる。

### 3. 地盤状況の変化に伴う地盤振動特性の変化

#### 3.1 計測体制

地盤内 S 波速度構造を反映する地表での表面波位相速度 (=分散曲線) と地盤増幅特性を把握することを目的として、各地盤状況で様々な地盤探査を行なった。各地盤状況と、実施した探査を図 3.1 と表 3.1 にまとめる。

#### 3.2 基本的な地盤振動特性の把握

基本的な地盤振動特性を把握するため、鋼管杭や地盤改良杭が存在しない地盤状況①の計測結果について分析する。地盤増幅特性を示す H/V スペクトルでは 0.8 Hz に明瞭なピークが存在し、これは深度 70 m 付近の速度コントラストが大きい層境界に起因するものと考えられる。また、実測から得られた H/V スペクトルのピークや分散曲線は、観測地点近傍の PS 検層データを用いた解析結果と非常に良い対応を示していた。(図 3.2) これより、複数の地盤探査によって得られた計測結果は、計測点位置の地盤構造をよく反映していることが確認できた。

#### 3.3 地盤振動特性の変化

各地盤状況での計測結果から、地盤改良や残存杭・新杭による地盤振動特性の変化を分析する。地盤状況ごとの H/V スペクトルと分散曲線を図 3.3、図 3.4 に示す。杭長から、地盤構造に変化が生じるのは 60 m 以浅と推測されるため、0.8 Hz のピーク形状に着目して検討する。

①と②から、地盤改良によっては H/V スペクトル・分散曲線は明確に変化していない。①と④から、残存杭によって分散曲線では位相速度が上昇しているが、H/V スペクトルではピーク形状は明確に変化していない。①と③から、新杭によって位相速度が上昇しており、H/V スペクトルにおいてもピーク形状が著しく変化していた。

以上から、地盤改良が地盤内 S 波速度構造に与える影響は小さいといえる。鋼管杭によっては、分散曲線の変化から地盤内 S 波速度が上昇していると考えられ、それによって地盤増幅特性も変化しているとみられる。

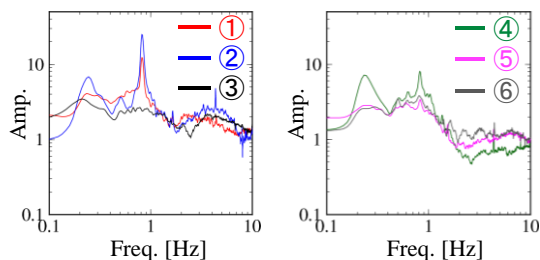


図 3.3 地盤状況ごとの H/V スペクトル

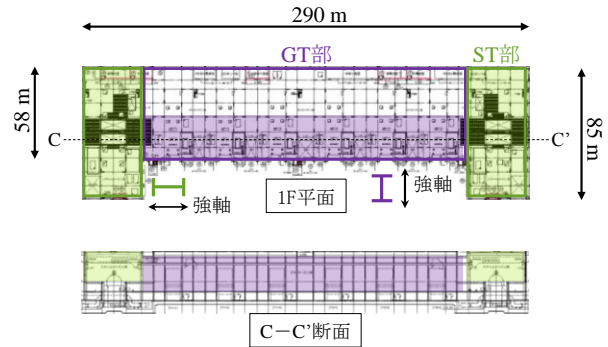


図 2.2 1F 平面と断面図

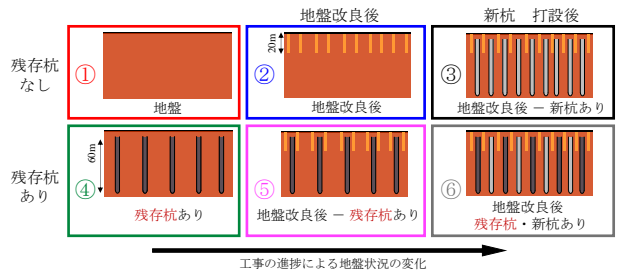


図 3.1 地盤状況まとめ

表 3.1 実施した地盤探査一覧

地盤状況	探査方法	測線長さ (m)	
		探査可能深度 (m)	探査可能深度 (m)
地盤状況①	三角微動アレイ探査	100	100
		200	200
	L字微動アレイ探査	50	70
	浅層レイリー波探査	46	20
地盤状況②	三角微動アレイ探査	100	100
	L字微動アレイ探査	50	70
	浅層レイリー波探査	46	20
地盤状況③	三角微動アレイ探査	100	100
	L字微動アレイ探査	50	70
	浅層レイリー波探査	46	20
地盤状況④	三角微動アレイ探査	100	100
	L字微動アレイ探査	40	40
	浅層レイリー波探査	46	20
地盤状況⑤	三角微動アレイ探査	100	100
	L字微動アレイ探査	40	40
	浅層レイリー波探査	46	20
地盤状況⑥	三角微動アレイ探査	100	100
	L字微動アレイ探査	50	70
	浅層レイリー波探査	46	20

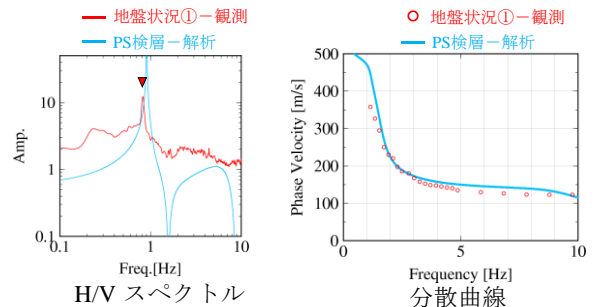


図 3.2 地盤状況①の計測結果と PS 検層による解析結果

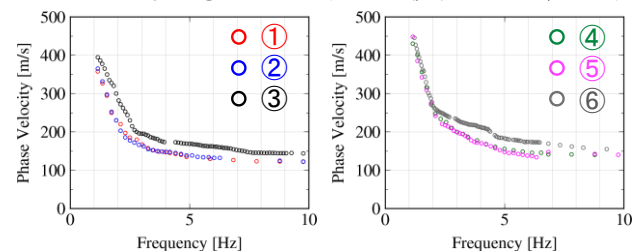


図 3.4 地盤状況ごとの分散曲線

#### 4. 長大基礎を有する建物の振動特性

新設発電所建屋は、複雑な立体的振動挙動を示すと考えられる。これらを詳細に捉えるため、様々な建設段階にて行なった発電所建屋における常時微動計測結果から、アニメーションによる可視化ツール<sup>4-1)</sup>を用いて分析を行う。このアニメーションツールによって、多点での計測記録について指定した振動数帯域での時刻歴の変位を出力することで、変形挙動を把握することができる。本論では、センサ精度と発電所建屋の固有振動数から 0.5～3 Hz 程度に着目して検討を行う。

##### 4.1 計測体制

長大な基礎の変形挙動を詳細に把握するため、図 4.2、図 4.3 に示すセンサ配置で常時微動計測（第 1 回）を行なった。この時点では、マットスラブ基礎はすべて打設されているが、上部構造は一部のみ存在していた。

竣工後の挙動を考える上で、基礎の挙動が上部構造の建設によって変化するか把握しておく必要がある。そのため、上部構造が完成した時点で同様のセンサ配置で常時微動計測（第 2 回）を行なった。第 2 回においては、基礎を含む建屋全体の詳細な振動挙動を把握するため、図 4.3、図 4.5 に示すセンサ配置で常時微動計測を行なった。

##### 4.2 基礎の立体的振動挙動

第 1 回での計測について、振動数帯域ごとの挙動を図 4.6、図 4.7 に示す。図内には、前節で示した分散曲線から推定した振動数ごとの波長も併せて示す。基礎は、常時微動時において変形挙動を示しており、その変形は振動数ごとの表面波の波長に依存している。長辺方向では、水平方向で 1.5 Hz 以下、上下方向で 2.0 Hz 以下の振動数において波長と変形形状が一致し、それ以上の振動数においては波長と変形形状が一致しなかった。地盤観測点のスペクトルから、地盤から基礎への入力 は 1.5 Hz 以上の振動数で同程度と考えられる。対象建物基礎は、面外剛性に比べ面内剛性が大きい。波長と一致する振動数の水平方向と上下方向の差は、これら剛性の違いによるものと考えられる。短辺方向では、構面ごとにロッキング挙動が位相差を伴って生じており、これによって基礎全体が立体的なねじれ挙動を示していると考えられる。

第 1 回、第 2 回における同様のセンサ配置の計測について、各振動数での挙動を図 4.8 に示す。本論で着目している振動数帯域では、基礎変形は建設の進捗によって変化せず、振動数ごとの表面波の波長に依存している。

##### 4.3 建物全体の立体的振動挙動

基礎ー建屋頂部の伝達関数を図 4.9 に、振動数帯域ごとの挙動を図 4.10、図 4.11 に示す。躯体完成後における上部構造の固有振動数は、実測から短辺方向で 2.3 Hz、長辺方向で 2.5 Hz であった。建屋全体は、0.5～1.5 Hz の低振動数帯域では、基礎と上部構造が一体となって挙動しており、振動数ごとの波長による基礎変形に依存して上部構造も同様の挙動を示している。1.5 Hz 以上の振動数では、上部構造の固有振動数に近づくにつれ水平動が

支配的となった。固有振動数付近においては、上部構造にねじれ挙動や S 字型の変形が表れており、これらの変形状態には、基礎が剛体ではなく変形挙動を伴うことが大きく影響を与えていると考えられる。

#### 5. まとめ

埋立地に立地する発電所を対象とし、地震時挙動を把握するため実際に様々な計測を行なった。地盤計測から、鋼管杭によって地盤内 S 波速度構造が変化している傾向が確認でき、地盤増幅特性が変化する可能性がある。また、長大な基礎は常時微動時も変形挙動を示しており、変形は表面波の波長に依存している。基礎の変形挙動は、基礎サイズや地盤構造から凡そ推定できると考えられる。埋立地に存在する大規模構造物の挙動においては、表面波による基礎変形を考慮する必要があると考えられる。

##### 参考文献

- 1) 廣野衣美：立体振動分析支援アニメーションツールの開発と効果的分析のための多点観測体制の提案，名古屋大学大学院修士論文，2008

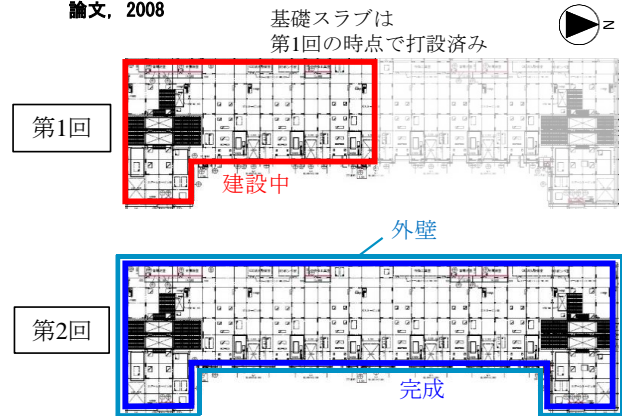


図 4.1 計測時の上部構造の建設進捗状況

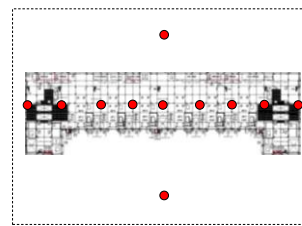


図 4.2 第 1 回で実施したセンサ配置 (case1-1)

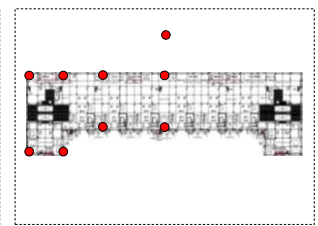


図 4.3 第 1 回で実施したセンサ配置 (case1-2)

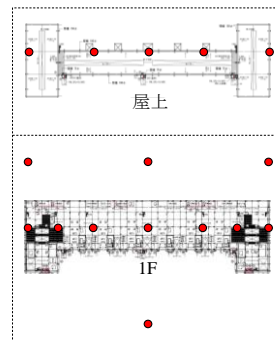


図 4.4 第 2 回で実施したセンサ配置 (case2-1)

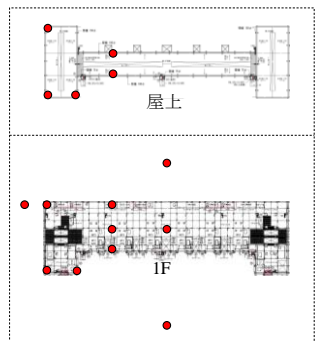


図 4.5 第 2 回で実施したセンサ配置 (case2-2)



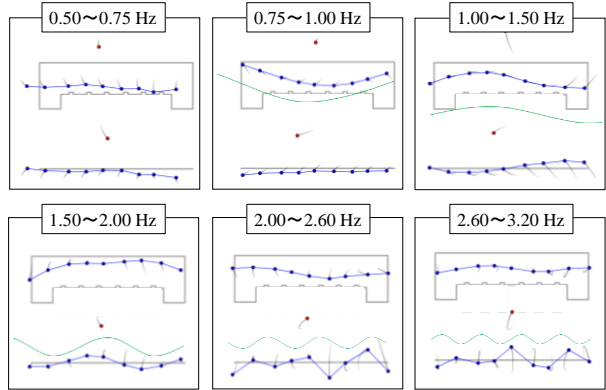
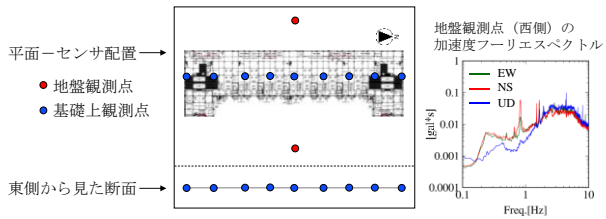


図 4.6 振動数帯域ごとの基礎の変形挙動 (case1-1)

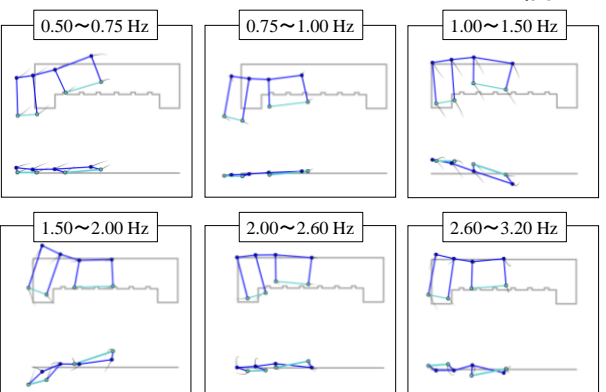
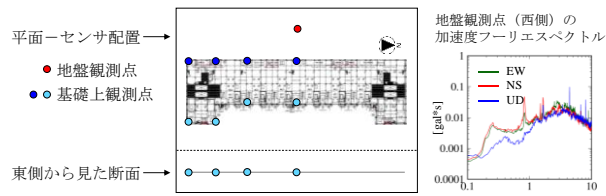


図 4.7 振動数帯域ごとの基礎の変形挙動 (case1-2)

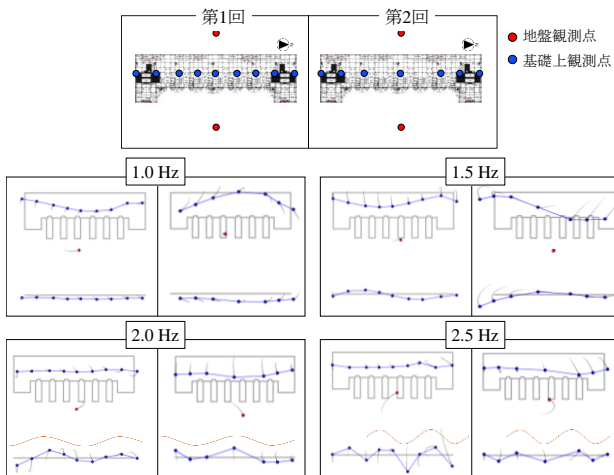


図 4.8 上部構造の建設に伴う基礎変形挙動の変化

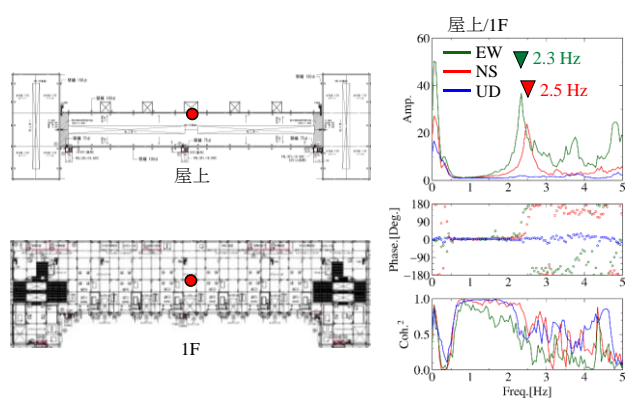


図 4.10 第 2 回での基礎-建屋頂部の伝達関数

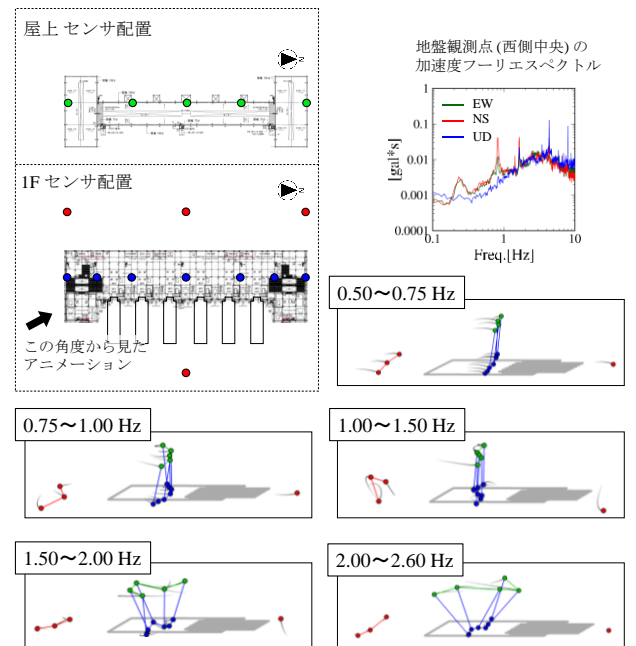


図 4.10 振動数帯域ごとの建屋全体の変形挙動 (case2-1)

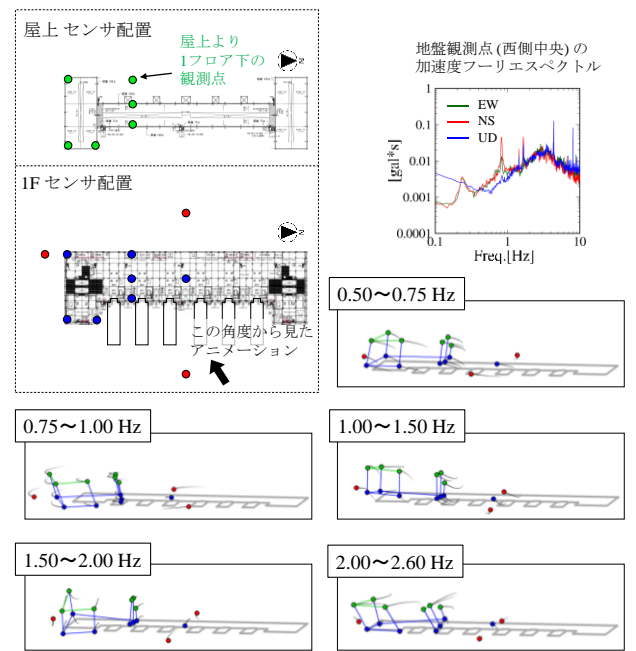


図 4.11 振動数帯域ごとの建屋全体の変形挙動 (case2-2)