

大規模堆積盆地に立地する超高層建物と地盤との共振現象に関する研究

名古屋大学工学部社会環境工学科
建築学コース福和研究室 寺島芳洋

1. 研究の背景と目的

堆積平野に多く存在する超高層建物は、長周期地震動と共振する可能性が高く、構造被害や家具の移動・転倒等による危険性があり、居住者人口も多い。また、避難も困難で、復旧に時間がかかること等が懸念されている。

東北地方太平洋沖地震では、震源域から約 600 km 離れた大阪平野において多くの地点で震度 3 であったが、大阪府咲洲庁舎 52F において最大片振幅 130 cm 以上の揺れが観測され、内装材剥離・昇降機停止等の被害(表 1)が生じた。建物と地盤とが共振したため、非常に大きな揺れが生じたと考えられる。震源域からの距離が、この約 1/5 で発生する南海・東南海地震において、さらに大きな被害を受ける可能性が高い。

また、東北地方太平洋沖地震では、想定外の $M_w 9.0$ であった等、地震動を予測することの難しさが再確認された。したがって、将来の予測に加えて、過去の強震記録を詳細に分析し、建物の実際の振動特性を把握することが重要である。本研究では、上述の咲洲庁舎について、地盤震動特性と建物振動特性に注目して、分析・考察を行う。

2. 咲洲庁舎の概要

咲洲庁舎は、地上 S 造 52F、地下 SRC 造 3F、最高部高さ 256 m の超高層建物である。建物概要を表 2 に示す。強震計は、1F、18F、38F 中央と 52F 両端に設置されている。52F の記録は、両端の記録を平均して用いる。地盤震動特性については、約 3.5km 離れた KiK-net 此花の強震記録を分析する。

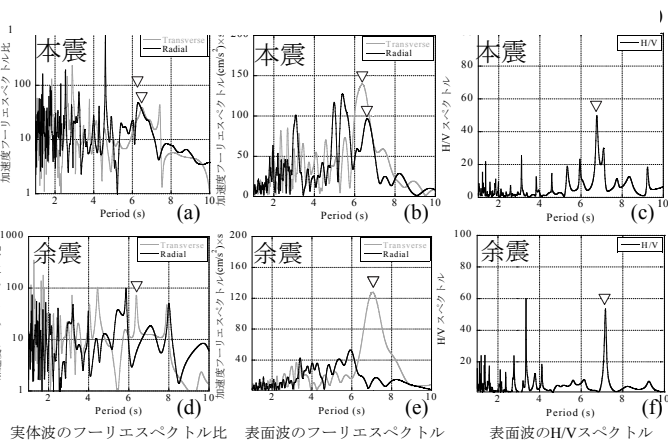
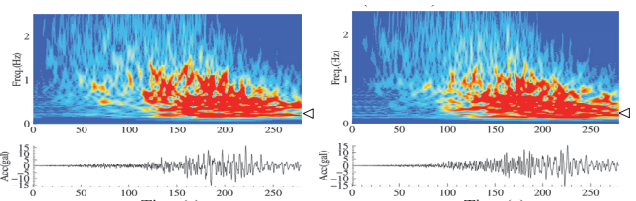
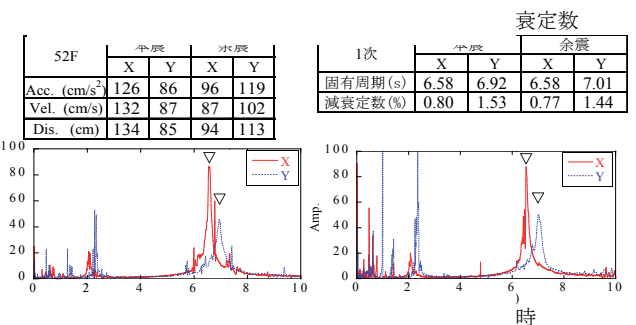
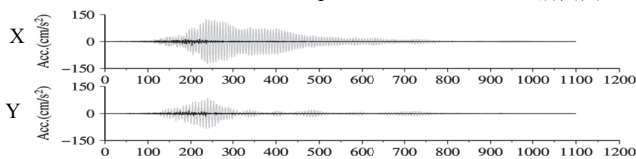
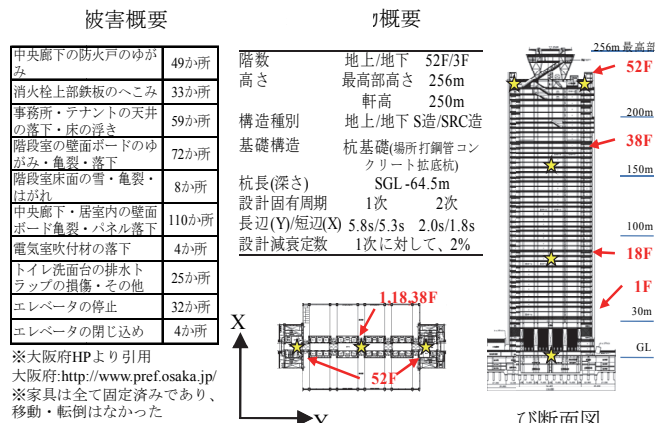
3. 本震・余震における咲洲庁舎の振動特性の分析

以後、東北地方太平洋沖地震の本震(2011/3/11/14:46 発震)・余震(同 15:15 発震)を『本震』『余震』と呼称する。本震において、観測された 52F の加速度波形を図 2 に、最大加速度・速度・変位を表 3 に示す。図 2 から、10 分以上揺れが継続したことがわかる。伝達関数(52F/1F)を図 3 に、伝達関数から推定した 1 次固有周期と減衰定数を表 4 に示す。1 次固有周期が X 方向で 6.5 秒付近、Y 方向で 7 秒付近であり、設計値に比べ、観測記録から推定した値は、かなり長いことがわかる。

4. 本震・余震における KiK-net 此花の震動特性の分析

本震において、KiK-net 此花で観測された加速度波形、非定常スペクトルを図 4 に示す。Love 波・Rayleigh 波を分析するために、NS・EW 方向を、Transverse 方向、Radial 方向に座標変換した。図 4 から後続部において、長周期成分が卓越し、短周期成分が少ないことから、表面波であることがわかる。ここでは、175 秒より前を実体波、後続を表面波と見なす。

本震と余震について、実体波の地表/基盤のフーリエスペクトル比・表面波のフーリエスペクトル・表面波の Radial 方向の H/V スペクトルを、図 5 に示す。図 5(a), (d) から、実体波について、6.3~6.5 秒の成分の波が卓越しやすい傾向が見られる。一方、余震の Radial 方向からは、傾向を読み取ることはできない。図 5(b), (e) から、本震時において Love 波は、6.4 秒付近、Rayleigh 波は 6.7 秒付近で卓越していることがわか



る。一方余震では、Love波が7秒付近で、大きく卓越していることがわかるが、Rayleigh波の卓越は見られなかった。図5(c), (f)から、Radial方向のH/Vスペクトルの卓越は、Radial方向のフーリエスペクトルの卓越とよく対応していることがわかる。さらに、H/Vスペクトルを用いるとRayleigh波のピークが判別し易いことがわかる。しかし、H/Vスペクトルは鉛直成分で除すことから、鉛直成分が非常に小さい周期帯でピークとなるため、地震動の振幅が小さい区間では、意味のあるピークの判断が難しい。

また、本震と余震で実体波の卓越周期に大きな差は見られない。一方、表面波の卓越周期は、本震と余震でやや異なることがわかる。表面波は盆地端部で生成され、盆地への入射方位によって震動特性が変わるためであると考えられる。

5. 理論解析に基づく咲洲・KiK-net 此花の地盤震動特性

地盤震動特性の分析に際し、実記録の分析に加えて、地盤モデルを理論解析することで、理論的な実体波の伝達関数、H/Vスペクトルを求めることができる。此花の地盤モデルを理論解析する。地盤モデルは、作成手法・時期、目的により様々なモデルが存在する。図6, 図7, 表5に、各モデルのS波速度構造、理論解析の結果を示す。なお、理論的な伝達関数やH/Vスペクトルのピークは、概ね層厚と物性値による。したがって、実際の地盤の物性値を考慮している産業技術総合研究所の地盤モデルが、最も精細に、実際の地盤震動を表現できると考えられる。図6から、モデルごとに物性値や層厚、基盤深が異なっていることがわかる。その結果として、図7, 表5からわかるように、伝達関数・H/Vスペクトルの卓越周期に違いが現れる。同一地点でも地盤モデルによって卓越周期や増幅率に幅があり、地震動予測において十分な検討が必要であることがわかった。産業技術総合研究所モデルの解析結果に注目すると、図7(a)から、実体波は、6.3秒付近で卓越し、(b)から、Rayleigh波は、6.8秒付近で卓越することがわかる。咲洲庁舎の地盤モデルについても概ね同じ結果(表6)となり、KiK-net 此花での分析により咲洲庁舎の地盤震動特性を十分説明できることがわかった。

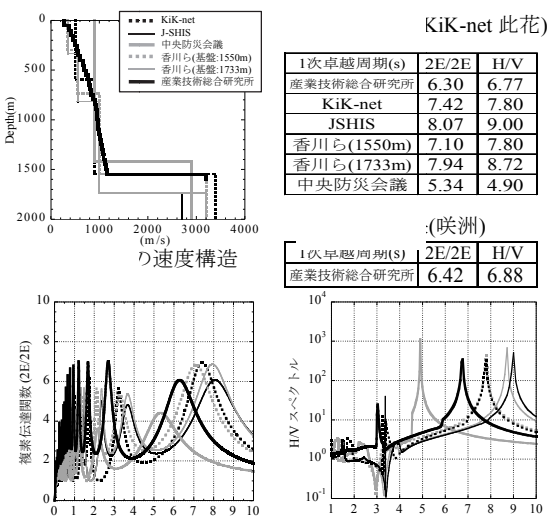


図7 理論解析の結果

6. 表面波の到来方向が卓越周期に及ぼす影響

大阪平野は、堆積盆地に位置しているため、地震波の到来方向によって、表面波の励起の傾向が異なることが考えられる。仮に、地震波の到来方向によって、傾向があるならば、来る巨大地震への対策に活かすことができる。本節では、地震波の到来方向に着目して地盤震動特性を分析する。

分析には、6s以上の成分を多く含む地震動全21記録を用いた。実体波については地表/基盤の伝達関数を、表面波に対しては、波の全体に対しての表面波の割合を比較するために、加速度波形のRMSで基準化したフーリエスペクトルを用いた。M_j6.0以上の地震の基準化加速度フーリエスペクトルを図8に示す。図中の印は、分析地震の震央を、印の大きさは、M_jの大きさを表している。図8からM_jの大きな地震では、小さな地震と比較して、長周期成分が多く含まれていることが分かる。特に、M_jが7を超える、図8(a)本震(M_j8.4)・(b)余震(M_j7.4)・(c)鳥取県西部地震(M_j7.3/2000年)・(d)紀伊半島沖地震(M_j7.4/2004年)において、Love波は6.2秒から7.1秒の卓越が見られ、Rayleigh波は5.9秒から6.5秒の卓越が見られた。規模の小さい地震に対しては、表面波が卓越しなかった。結果として、表面波の卓越周期には地震によって0.5秒~1.0秒程度の幅があり、到来方向による傾向は見られなかった。実体波については、卓越周期が6.0秒~7.0秒と幅がある。

7. 結論

咲洲庁舎の建物の1次固有周期と減衰定数を概ね推定することができた。その結果と設計値を比較して設計値が短辺、長辺とも1秒以上幅があることがわかった。減衰定数も、設計よりも小さいことがわかった。地盤の卓越周期は、地盤モデルにより大きく幅があることがわかった。表面波は、規模の大きい地震において卓越し、その卓越周期も地震によって幅があることがわかった。実体波についても、地震によって卓越周期や増幅率に幅があることがわかった。

このようにモデルから共振現象を予測することは非常に難しく、予期せぬ共振を起こす建物は、他にもあると考えられる。設計時の固有周期・地盤モデルを過信せず、建物・地盤ともに、観測記録を積み重ね、詳細に分析し、設計・対策に活用することが大変重要である。

