福和研究室 寺島 芳洋

1. 序論

東北地方太平洋沖地震の際に,震源から 700 km 以上 も離れた大阪府咲洲庁舎の最上階において最大片振幅 137 cm・継続時間 10 分以上の揺れが観測された. 地震 動のやや長周期域における卓越周期と咲洲庁舎の1 次固 有周期が一致して共振現象が発生したためである.

共振現象を防ぐには、地震動の卓越周期と対象物の固 有周期を近接させなければ良く、対象地点における地震 動の卓越周期の適切な評価が必要である.一般に、地震 動の卓越周期はサイト固有の値と考えられることが多い が、やや長周期域の地震動の卓越周期が地震によって変 動すること(以後、周期変動と呼ぶ)が報告されている.

また、南海トラフの地震などの巨大地震の地震動予測 では、告示スペクトルを超えるような地震動も予測され ており、例えサイト波の卓越周期を外して構造物が設計 されたとしても、周期変動の幅を適切に評価し考慮しな ければ、共振現象が発生する可能性がある.

以上の背景から本研究では地震観測記録と数値解析に 基いて,堆積盆地における地震動の周期変動について要 因分析や定量化を見据えた基礎的な研究を行う.

2. 観測記録に基づく周期変動の分析

咲洲庁舎に近い地震観測点の此花(OSKH02)の地震 記録を用いて周期変動の概観と要因分析を行う.

 $M_j > 6.0$ の地震について、地震動の水平成分の RMS 規準化フーリエスペクトルを重ね書いたものを図1に示した.赤線は、平均値である.6秒に明瞭な卓越を持ち5~7秒にかけての周期変動が見られる.スペクトルの平均値も、緩やかな卓越を示しており、此花における地震動の卓越周期が広い幅を有していることを表している.

此花は、盆地の中心に比較的近く岩盤上面深度が深い ために、上述の特性を示した可能性があり、似た点にお いても分析が必要だが、一般公開されている K-NET や KiK-net の観測点に該当はないため、今後の課題となる.

次に,岩盤サイト(能勢)の地震動を盆地への入力と 考え,盆地内観測点(此花)と合わせて地震毎の盆地に よる増幅特性を比較する.図2に検討した地震を示す.

図3に此花と能勢の地震動のフーリエスペクトルを示 す. 能勢では EQ07 と EQ13 で 5.8 秒と 6.7 秒の振幅に あまり差がないが,此花の卓越周期は,EQ07 では約 5.8 秒,EQ13 では約 6.7 秒と異なっている.従って地震毎 に盆地構造による増幅特性が異なり,EQ07 では 5.8 秒, EQ13 では 6.7 秒が大きく増幅されたことがわかる.





図 3 此花と岩盤サイトの比較(上: OSKH02, 下: OSK001) 3. 周期変動が建物振動に与える影響

3章では、2章から得られた幅2秒の周期変動が建物振動に与える影響について分析を行い、周期変動の重要性 を検討する.卓越周期の異なる地震動を作成し、仮想超高層建物の地震応答解析を実施し、結果を比較する.

仮想超高層建物のモデル作成には咲洲庁舎を参考にした.表1に建物モデル諸元を示す.建物モデルの建物高 さと階数はビルディングレターより設定した.

入力地震動は東南海・南海地震を想定し、震源モデル は鶴来らのモデル(図 4)を用いた.破壊開始点は足摺 岬沖とし同心円状に破壊が伝播するものとした.地盤構 造は此花における PS 検層結果の層厚を固定したまま S 波速度を調整して一次固有周期が 5.5 秒 (ケース 1)~7.5 秒 (ケース 5)の5 ケースの地盤構造を設定した.図5 に設定した S波速度構造と、SH 波の増幅度を示す.

地震動作成には、地盤の周期特性が支配的となるよう な滑らかな震源特性が作成できる翠川・小林(1982)を 用いた.実地震に近い波形を作成するため、位相情報作 成には統計的グリーン関数法を採用した.

図6に作成した地震動の速度波形と擬似速度応答スペクトル(*h*=5%)を示す.疑似速度応答スペクトルから, 卓越周期の違いが表現できていることが確認できる.

図7に最大応答分布を示す.最大応答加速度は地動最 大加速度で基準化した.最大応答加速度は、ケース5の 最上階の1.0倍に対して建物と地盤の固有周期が近接す るケース2及び3では1.3~1.5倍である.最大応答変位 は、ケース5の最上階の約180 cm対してケース2及び3 は約230 cmと約1.3倍である.最大層間変形角は、ケー ス2及び3はケース5に対して最大で約1.3倍である.

以上から、2 秒の周期変動を有する地点では、同様な 規模の地震においても、最大で1.3~1.5 倍程度応答が変 わる可能性があり、周期変動が建物振動に与える影響は 決して小さくないことがわかった.



4 章では,有限差分法によるシミュレーションから地 震動の周期変動の要因分析を行う.2 章の検討から盆地 構造に注目する.周期変動の要因として盆地構造や地震 波の到来方向,震源深さを考え,種々の解析モデルを作 成し,シミュレーション結果に基づいた考察を行う.

図8に基本となる地盤構造モデル,表2に物性値を示 す.本章では,図8のbの大きさや震源位置を変化させ た時の地震動特性の変化を分析するため,単純な震源で あるインパルス関数で表現される単力源を設定した.



(1) 盆地構造と地震波の到来方向の影響

盆地構造を考えるにあたって、端部で波が反射し盆地 内にとどまるトラップと盆地に波が入射する際の焦点効 果を考えなければならない.加えて、平面形状が楕円の 盆地では、地震波の到来方向によって盆地中央の地震動 の卓越周期が変動することが報告されており、この変動 も到来方向によってトラップや焦点効果の性状が異なる ことに起因すると考えられる.したがって、①盆地構造 によるトラップの影響、②盆地構造による焦点効果の影 響、③地震波の到来方向の影響に注目して分析を行う.

盆地構造によるトラップや焦点効果の影響を分析する にあたって、トラップ効果の有無・焦点効果の有無を組 み合わせて3つのモデルを設定した(図9).加振点は地 表に設定し、その位置は解析モデル中心から50kmの位 置に設定した.加振方向は鉛直下方とした.したがって 解析結果ではレイリー波が卓越する.



図9 検討に用いる3つの地盤構造モデル

①盆地構造によるトラップの影響

①では、図 9 (a) と (b) のモデルの解析結果を比較 する.図 10 に盆地中央点における変位波形と変位フー リエスペクトルの radial 成分を示す.変位波形では 50 秒 以降に明瞭な違いが現れている.また,スペクトルでは, 周期4秒以上の帯域においてトラップが発生するモデル が発生しないモデルと比較して,周期が長くなるにつれ 振幅が交互に大小となっており、トラップの影響は直達 波と反射波の経路差による干渉であると考えられる.

図11に周期4秒における変位フーリエ振幅(radial 成分)の空間分布を示す.加振点は(500,750)に設定し, 盆地端部は(*,625)と(*,375)であり,図11の範囲 は盆地内となる.図11よりトラップが発生するモデルに おいてフーリエ振幅が大小となる干渉縞が確認できるこ とからも,トラップの影響が干渉であることが言えよう.





図9(a)と(c)のモデルを比較する.図12に盆地中 央点における変位波形と変位フーリエ振幅スペクトルの radial 成分を示す.焦点効果波は直立波とほぼ同時刻に 到達するため変位波形では初動到達に近い時刻から違い が現れている.また、スペクトルでは、トラップによる 影響よりは見づらいが周期4秒以上の帯域では焦点効果 が発生するモデルが発生しないモデルと比較して、周期 が長くなるにつれ振幅が交互に大小となっており、焦点 効果の影響は直達波と焦点効果波の経路差による干渉で あると考えられる.

図13に周期4秒における変位フーリエ振幅(radial 成 分)の空間分布を示す.加振点は①と同じである.図13 に盆地の平面形状を併せて示した.焦点効果が発生する モデルにおいてフーリエ振幅が大小となる干渉縞が確認 できることから,焦点効果の影響が干渉であることが言 えよう.そして,焦点効果による干渉はトラップのそれ よりも複雑な性状となっていることがわかる。



③地震波の到来方向の影響

続いて、地震波の到来方向が地震動特性に与える影響 を分析する.これまでの検討を加味すると、影響の要因 は変わらないことが考えられ、盆地形状に対して非対称 な方向から波が入射すると焦点効果やトラップによる干 渉が単純な円形盆地と比較してより複雑になることが予 測できる.そこで本節では、到来方向による地震動特性 の変化が、焦点効果・トラップによる干渉に基づく結果 であることを確かめ、到来方向の変化による干渉の変化 と周期変動を概観するに留めておく.

地盤構造モデルは図 8 において *a* = 50 km, *b* = 25 km とした楕円形盆地モデルを用いる.図 14 に地盤構造モデ ルと加振点位置を示す.

図15に、盆地中央点における地震動のフーリエスペク トルの一例としてy成分を示す.加振点aからfを黒色 から赤色のグラデーションで表している.前節までの検 討と比較して、フーリエスペクトルの変化は非常に複雑 なものとなっている.周期変動幅は4~5秒のピークに注 目すると1秒程度となっている.

次に、変位フーリエ振幅スペクトルの空間分布を概観 する.図16に周期4.0秒の変位フーリエ振幅の空間分布 を示す.一例として加振点aとdについて示す.両加振 点とも振幅が大きい地点と振幅が非常に小さい地点が存 在しており干渉の効果が見られ、到来方向によって干渉 が異なることも確認できる.



(2) 震源深さの影響

(1) ③では、地震波の到来方向の影響を分析し、平面 的な入射角の相違によって地震動特性が異なることがわ かった.(2)では、深さ方向の入射角の影響を分析する. 実体波について基盤への入射角が地表における地震動に 影響を与えることは良く知られており、表面波に対して も同様の現象が起きることは十分に考えられる.

盆地への深さ方向の入射角の変化は震源深さを連続的 に変化させることで表現する.加振点位置はモデル中心 から 50 km の位置とし、加振方向は鉛直下方とした.従って解析結果ではレイリー波が卓越する.震源深さは,0,1,…,4,7…,22 km である.地盤構造モデルは図8に示す円形盆地モデルを使用し、分析には盆地中央点を用いる.解析の簡単な概念図を図17 に示す.

震源深さの変化に伴うフーリエスペクトルの変化を図 18 に示す. 震源深さを黒色(0 km)から赤色(22 km) のグラデーションで示した. 震源深さの変化に伴うスペ クトルの変化は,干渉によるスペクトルの変化とは明確 に異なる.干渉によるスペクトル形状は,例えば経路差 を連続的に変化させればピークが連続的な変化をするが, 図18では1つのピークの卓越周期はほとんど変化せずに それぞれのピーク高さの割合が変化している(radial 成 分の4.5秒と5.5秒のピークが該当). 震源深さの影響と して,このモード間の卓越周期の差が周期変動となり, 本解析においては約1.0秒の幅となる.

図 19 に, 地表加振時のスペクトルと理論分散曲線を示 す.スペクトルの長周期域におけるピークを波線で示し た.a及びcのピークは基本モード,b及びdのピークは 高次モードのエアリー相に対応していることがわかる.

以上の検討から,震源深さが地震動特性に与える影響 に関して,震源深さが変化するとモードの励起のされ方 が変化すること,それぞれのモードにおける卓越周期は ほぼ変化しないことがわかった.

上述のように、それぞれの要因について変化させただ けでも地震動の卓越周期は 1.0 秒程度変動するため、こ れらの要因が組み合わさる実際の地震においてはさらに 大きな幅の周期変動が発生しても不思議はなく、此花に おいて2 秒程度の周期変動が生じることにも頷ける.



図 19 フーリエスペクトルと理論分散曲線の対応 5. 表面波に対するスペクトルインバージョンの適用性

ここまで盆地構造による周期変動を考えたが、付加体 などの伝播経路特性や震源の特性によっても周期変動は 発生し得る.地震動を震源・伝播経路・サイトの特性に 分離する手法としてスペクトルインバージョンがある. しかし、従来実体波に適用されてきた手法であり、表面 波に適用された例は少ない.そこで5章では、スペクト ルインバージョンの表面波に対する適用性の検討を行う.

本章では、実体波が卓越する地震動と表面波が卓越す る地震動を作成し、それぞれの結果にスペクトルインバ ージョンを行い、両者の推定結果を比較して、表面波に 対するスペクトルインバージョンの適用性を検討する. 一様地盤モデルを用いて実体波が卓越する地震動、堆積 盆地構造モデル(図 20)を用いて表面波が卓越する地震 動を作成する.解析モデルの諸元を表3に示す.

図 21 に円形盆地と一様地盤における推定結果を示す. 円形盆地において推定された岩盤サイトのサイト特性は 差が小さいが,一方で震源特性は一様地盤の震源特性と 比較して全区間で大きめの推定, Q 値は小さめの推定と なっており,その誤差は決して小さくない.

結論として,現時点では,スペクトルインバージョン を用いた表面波の分析は難しいと言わざるを得ず,表面 波に対するモデル式の構築が必要である.N



6. 結論と今後の展望

本研究では,長周期構造物を考えるにあたって非常に 重要である周期変動という問題に対して,観測記録と数 値解析の両面から周期変動の分析を行った.告示スペク トルの改定に必要である定量化には至らなかったものの, 要因や傾向分析など定量化に向けた基礎的な知見を得る ことができた.

今後は,実際に近い盆地モデルを設定した数値解析に 基づく検討を行い,周期変動の幅や振幅の変化について 分析する必要がある.加えて,観測記録と解析結果の対 応も非常に重要であり,検討が必要である.