

大規模堆積盆地における地盤卓越周期の変動と長周期建物の耐震設計における課題

Dispersion of Ground Predominant Period of the Large Scale Basin
and Subjects on Aseismic Design of Long-Period Buildings

2. 構造 - 2. 振動

長周期地震動 卓越周期 H/V スペクトル
大阪平野 時刻歴応答解析

正会員 ○寺島 芳洋* TERASHIMA Yoshihiro
正会員 高橋 広人** TAKAHASHI Hirohito
正会員 福和 伸夫*** FUKUWA Nobuo

1. はじめに

近年、建築物の高層化や免震建物の増加に伴って、長周期地震動が着目されている。堆積盆地では、表面波が盆地端部で励起され盆地内に閉じ込められ、地震動の継続時間が長くなる。また、地震動は、波の到来方向・不整形地盤の影響を受けるという知見¹⁾²⁾がある。本論文では、堆積盆地内で観測された表面波を分析し、地震毎に卓越周期に変動があることを示す。また、その変動が長周期建物の地震時応答に与える影響について検討する。

2. 検討に用いた強震観測点と地震記録

表1及び図1に分析対象地震の一覧及び震央分布、図2に各観測点を示す。分析対象地震は、長周期成分が多く含まれるMwの大きな地震を、分析対象観測点は、それらの地震が多く収録されたK-NET、KiK-net観測点を用いた。分析する表面波部は、波形を観測点と震央の方位角でRT変換し、非定常スペクトルを元に切り出した。

分析には、地表の記録のH/Vスペクトルと速度フーリエ振幅スペクトル、地表と基盤のH/Hスペクトルの3つを用いた。H/Vスペクトルは、ラディアル成分と鉛直成分の振幅スペクトル比として計算した。なお、フーリエ振幅スペクトルは、周期特性を比較し易くするため、速度波形のRMS値で標準化した（以降、RMS標準化速度フーリエ振幅スペクトルと呼ぶ）。H/Hスペクトルは、地表と孔中とのトランスバース成分の振幅スペクトル比を用いた。また、速度H/V、H/Hの両スペクトル比は、同一地点のスペクトルで除しており、震源・伝播特性を打ち消し、サイト特性を反映していると考えた。

表1 検討に用いた地震の一覧

ID	Date	Lat.	Lon.	Dep.(km)	Mw
EQ001	2000.10.06 13:30	35.3	133.4	9	6.6
EQ002	2001.03.24 15:28	34.1	132.7	46	6.8
EQ003	2004.09.05 19:07	33.0	136.8	38	7.2
EQ004	2004.09.05 23:57	33.2	137.1	44	7.5
EQ005	2005.03.20 10:53	33.7	130.2	9	6.6
EQ006	2011.03.11 14:46	38.1	142.9	24	8.7
EQ007	2011.03.11 15:15	36.1	141.3	43	7.8

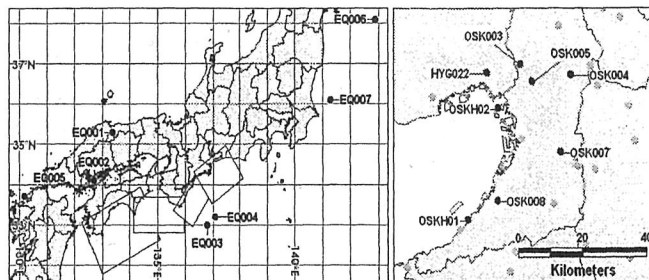


図1 対象地震の震央分布

図2 対象観測地点の分布

(□は、鶴来・他(2007)³⁾の巨視的震源モデル。)

3. 大阪平野の地盤震動特性

3.1 H/VスペクトルとH/Hスペクトル

図3に表面波のH/Vスペクトル、図4に表面波のトランスバース成分のRMS標準化速度フーリエ振幅スペクトル、図5に地表/基盤のH/Hスペクトルを示す。図3には大阪平野の深部地盤モデル⁴⁾から求めたレイリー波基本モードのH/Vを、図4、5にはラブ波基本モードのミディアムレスポンス/波数を、図3、4、5に地点毎の観測スペクトルの平均を合わせて示した。また、1次卓越周期の幅を両矢印で示す。幅は、理論スペクトル及び観測スペクトルの平均値を元に、観測スペクトルから1次卓越周期に相当すると考え得るピークから定めた。点線矢印は、卓越周期として判断が難しいピークである。

図3から、H/Vスペクトルの卓越周期は地震毎に変動し、その幅は1~2秒程度である。この変動は、ラディアル成分のサイト特性を表している。また、図4から、RMS標準化速度フーリエ振幅スペクトルの卓越周期も、1~2秒程度変動している。ここで、RMS標準化速度フーリエ振幅スペクトルには、サイト・震源・伝播の特性が含まれているが、図4と図5のスペクトルを同一地点で比較すると、概ねの卓越周期やその変動の幅が似ており、トランスバース成分の卓越周期の変動にもサイト特性が大きく影響していると考えられる。

*名古屋大学大学院環境学研究科・大学院生

**応用地質株式会社・博士(工学)

***名古屋大学減災連携研究センター・教授・工博

Grad. Student, Grad. School of Environmental Studies, Nagoya Univ.

OYO Corporation, Dr.Eng.

Prof., Disaster Mitigation Research Center, Nagoya Univ., Dr.Eng.

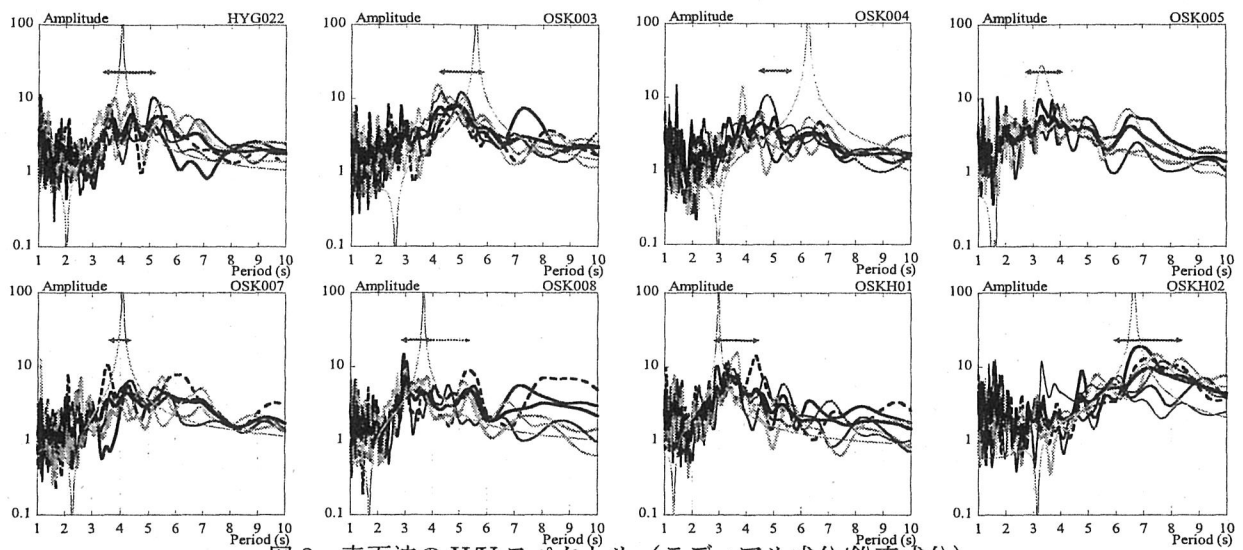


図3 表面波のH/Vスペクトル(ラディアル成分/鉛直成分)

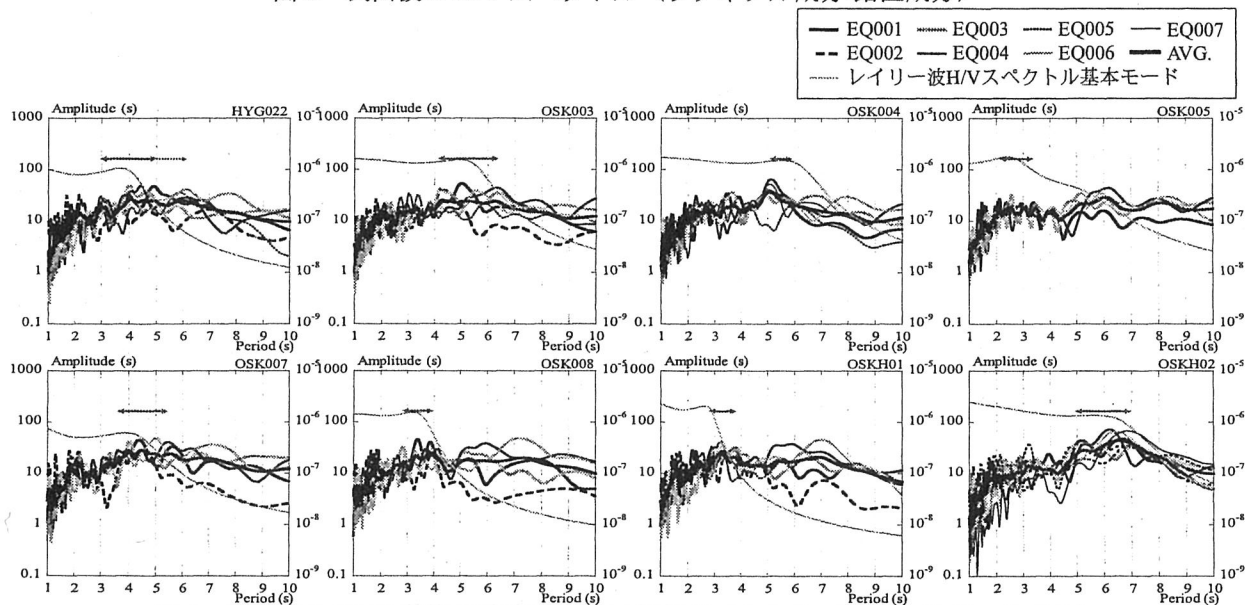


図4 表面波のRMS基準化速度フーリエ振幅スペクトル(トランスバース成分)

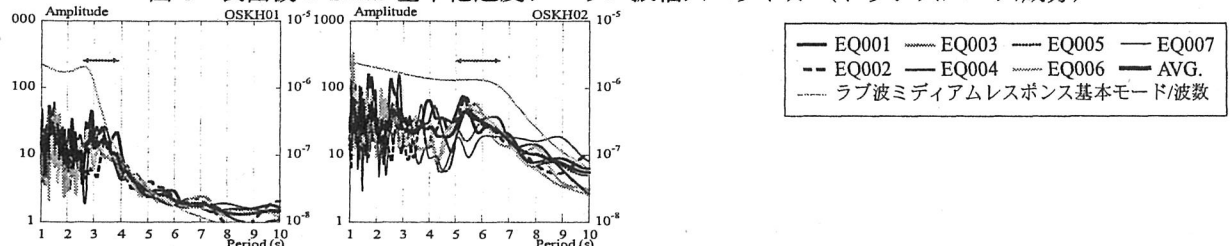


図5 地表/基盤のH/Hスペクトル(トランスバース成分)

3.2 卓越周期の変動の傾向とその要因

本節では、卓越周期と地震波の到来方向や鉛直方向の入射角との関係に着目してサイト特性の変動を分析する。到来方向には、観測点と震央の方位角を、入射角には、観測点と震源との見かけの入射角を用いた。

図6に、3.1節で求めたOSKH01及びOSKH02のH/V・H/Hスペクトルの卓越周期を到来方向別に示す。図7に、

卓越周期を見かけの入射角別に示す。なお、卓越周期は、図3,5に示した実線の両矢印の範囲内のピークから読み取った。また、図6・図7に、深部地盤モデルから求めたレイリー波基本モードのH/Vスペクトル・ラブ波基本モードのメディアムレスポンスの卓越周期を合せて示す。

図6より、地盤の卓越周期が1~2秒ほどの変動を持つことがわかる。卓越周期の変動と到来方向の関係は明確

には認められない。図7からは、卓越周期の変動と見かけの入射角の関係は認められない。特に、EQ3とEQ4については、両地震の震源は共に近く、両観測点への地震波の到来方向も似ているが、両観測点における地盤の卓越周期は近接していない。

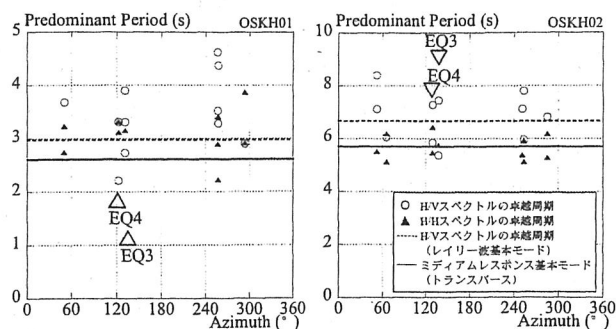


図6 地盤の卓越周期と地震波の到来方向の関係

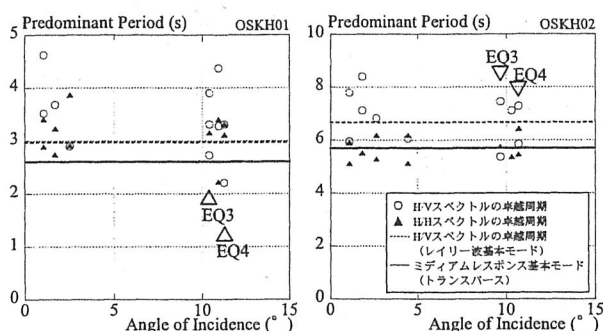


図7 地盤の卓越周期と鉛直方向の入射角の関係

以上、堆積盆地内の観測記録の表面波部の卓越周期について検討を行い、地震毎に地盤卓越周期がサイト特性によって変動することがわかった。また、本検討内では、平井ら¹⁾のような、卓越周期の変動と波の到来方向の関係は見られなかった。分析対象地震数が少ないことや見かけの到来方向を用いたことに課題があると考えられる。

4. 地盤の卓越周期の変動が建物振動に与える影響

本章では、地盤卓越周期の変動が建物応答に与える影響を検討する。その際、便宜上、地盤卓越周期の変動を、卓越周期の異なる複数の地盤モデルから入力地震動を作成することで表現した。

4.1 解析モデル概要

表2に仮想超高層建物モデルの諸元を示す。モデルの作成では、東北地方太平洋沖地震で地盤と共振し、大きな応答を記録⁶⁾した咲洲庁舎を参考にした。建物高さや階数は文献⁷⁾より設定し、1階床固定の多質点系せん断型モデルとした。内部減衰は1次固有周期に対して $h = 0.01$ の瞬間剛性比例型、復元力特性は完全弾塑性のバイリニア型とした。初期剛性は、1次固有周期が6.5秒、かつ最上階の応答波形が観測記録⁶⁾と合うように調整した。

各層の降伏耐力は、層間変形が $1/75$ となる時点とした。

図8に仮想建物の地震応答解析と観測記録を示す。応答の大きい100~350秒の区間では、概ね整合している。

表2 解析モデルの諸元

MODEL	超高層建物
高さ H[m]	227.90m
質点数	1階床固定の53質点系せん断モデル
振動型	
復元力特性	バイリニア型(完全弾塑性型)
減衰定数 h_1	剛性比例型(1次に対して1%)
固有周期 T_1	6.50
T_2	2.38

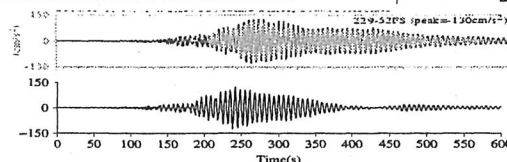
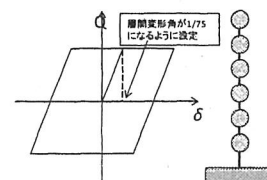


図8 最上階における観測波形と応答解析結果の比較
(上:観測波形⁶⁾ 下:応答解析結果)

4.2 入力地震動の概要

入力地震動は東南海・南海地震を想定し、OSKH02に対して作成した。震源モデルは鶴来ら³⁾を用いた。図1に巨視的震源モデルを示す。破壊開始点は足摺岬沖とし同心円状に破壊が伝播するとした。地盤構造はOSKH02の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~7.5秒の中で5ケースを設定した。なお、一次固有周期における増幅率が同等となるように地震基盤のS波速度も調整した。図9に設定したS波速度構造と、SH波鉛直入射の増幅度を示す。

地震動作成では、卓越周期の違いを表現することを目的とした。地震基盤の応答スペクトルが滑らかな形状となり地盤モデルによる差異を反映しやすい翠川・小林の方法⁸⁾を用いて、地震基盤の応答スペクトルを設定した。次に、統計的グリーン関数法⁹⁾で作成した時刻歴波形を位相波として、作成した地震基盤の応答スペクトルに合うようにフィッティングを行い、地震基盤の地震動を作成した。さらに、5つの地盤モデルを用いて、地表位置における入力地震動を作成した。なおS波速度が全層400 m/s以上であるため地盤の非線形性は考慮しない。図10に作成地震動の5%擬似速度応答スペクトルを示す。

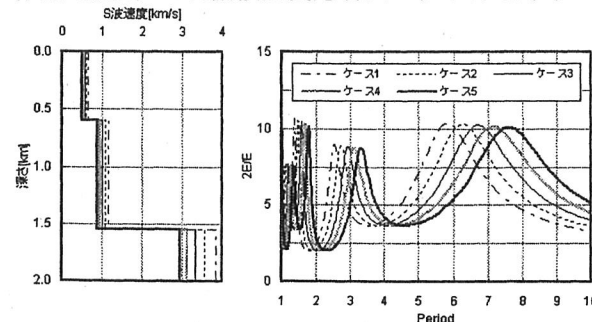


図9 設定した地盤のS波速度構造とSH波の増幅度

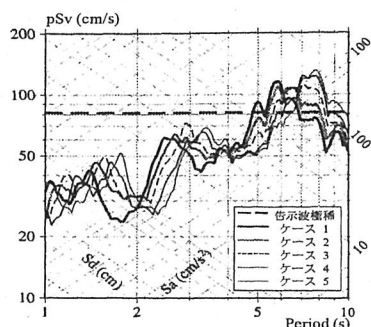
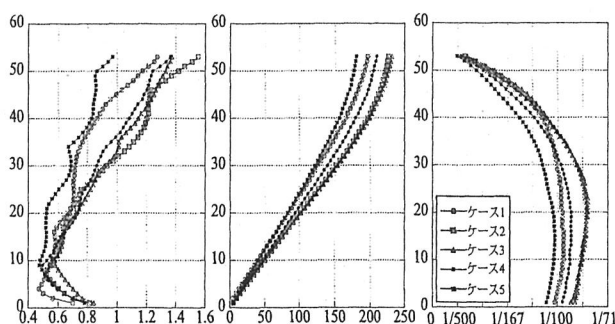


図10 サイト波の擬似速度応答スペクトル ($h=5\%$)

4.3 応答解析結果

図11に、高さ方向の最大応答分布図を示す。最上階の最大応答加速度倍率は、図11(a)のケース5では約1.0倍であるが、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、図11(b)のケース5に対して、ケース2及び3では、約1.3倍大きい。最大相間変形角は、図11(c)のケース2及び3はケース5に対して最大で約1.3倍大きい。



(a)基準化最大加速度 (b)最大応答変位 (c)最大層間変形角

図11 高さ方向の最大応答分布図

4.4 考察

一般的に、堆積盆地の深部地盤モデル構築では、複数の地震から重合平均したH/Vスペクトルに合うようにモデルをチューニングする⁵⁾。超高層建物や免震建物の設計では、これらの深部地盤モデルを用いて設計用入力地震動を作成する場合があります。その際には、深部地盤モデルの固有周期から建築物の固有周期をはずして設計する。しかし3章で示したように、地盤の卓越周期が1~2秒変動すると考慮すると、将来起こる地震動が想定した地盤の固有周期に対して同程度の変動を持つ可能性は十分にある。このため、深部地盤モデルの固有周期を外して設計した建物が、共振を起こして、大きな応答を生じる可能性も否定できない。超高層建物は、在館者が非常に多く、その影響度も高い。したがって、超高層建物に対しては、サイトにおける地盤卓越周期の変動を考慮して入力地震動を策定することが重要であり、場合によっては、三次元地下構造を考慮する必要もある。また、建物につ

いても、固有周期や減衰定数が設計と実測で異なる場合がある¹⁰⁾ため、設計を過信せず、建物の地震観測や微動計測を積極的に行う必要があると考えられる。

5. まとめ

本論では、大規模堆積盆地における表面波の地盤卓越周期の変動の存在を示し、仮想超高層建物モデルの時刻歴応答解析により、その変動が建物応答に及ぼす影響について検討した。これにより得られた知見を以下に示す。

1. 表面波の卓越周期に約1~2秒の幅の変動が見られた。

変動は、サイト特性によると見られるが、到来方向や入射角との関係は見られなかった。

2. 固有周期の異なる地盤モデルを用いた地震応答解析を超高層建物モデルに実施し、地盤卓越周期の変動の建物応答への影響を評価した。本検討では、入力地震動の卓越周期が約0.5~1.0秒異なると、最大変位応答・層間変形角が約1.3倍、最大加速度は、約1.5倍変化した。

本論では、H/Vスペクトルを中心に観測記録の分析を行ったが、地震動のH/Vスペクトルは、理論的根拠がそれほど明確でない。今後は、スペクトルインバージョンなどを交えて、より高精度なサイト特性の分離に取り組む予定である。

【謝辞】 K-NET, KiK-netの地震観測記録を使用しました。

【参考文献】 1) 平井敬・福和伸夫：震源方位による大規模堆積盆地の震動性状の違い-3次元有限差分法シミュレーションによる検討-、日本地震学会講演予稿集, pp89, 2012. 2) 中川博人・中井正一：斜面地盤が短周期微動のH/Vスペクトルと分散曲線に与える影響-2.5次元表面波入射解析による検討-、日本建築学会構造系論文集, 第75巻, 第656号, 2010.10 3) 鶴来雅人・趙伯明：東南海・南海地震による大阪での強震動予測事例-広域強震動の予測-シンポジウム論文集, pp.73-82, 2005. 4) 堀川晴央・水野清秀・石山達也・佐竹健治・関口春子・加瀬祐子・杉山雄一・横田 裕・末廣匡基・横倉隆伸・岩淵 洋・北田奈緒子・Arben Pitarka：断層による不連続構造を考慮した大阪堆積盆地の3次元地盤構造モデル, 活断層・古地震研究報告, No. 3, pp225-259, 2003. 5) 中央防災会議：東南海, 南海地震等に関する専門調査会参考資料, 2008 6) 鹿嶋俊英他：平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震における建物の強震観測記録, 建築研究資料, No.135号, 2012.3 7) (財)日本建築センター：ビルディンググレーター, 1991.1 8) H. Kobayashi and S. Midorikawa: A Semi-Empirical Method for Estimating Response Spectra of Near-Field Grand Motions With Regard to Fault Rupture, Proceeding of Seventh European Conference on Earthquake Engineering, September 20-25, pp.161-168, 1982. 9) 釜江克宏・入倉孝次郎・福知保長：地震のスケーリング則に基づいた大地震時の強震動予測：統計的波形合成法による予測, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 430, pp.1-9, 1991. 10) 佐武直紀他：実測資料に基づく建築構造物の減衰性状(その1: 鉄骨増建物), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.879-880, 1995.8