

大阪エリアでの断層段差構造による局所増幅を考慮した地震動評価法に関する研究

大阪大学大学院工学研究科
地球総合工学専攻 建築地震地盤学領域
宮本研究室

山口 陽 司

1. 序論

最新の地震動評価では、短周期成分は統計的グリーン関数法で計算されることが多い。しかし、統計的グリーン関数法では通常、地震基盤波を作成して1次元重複反射理論により工学的基盤まで増幅させること(従来法)が行われ、地盤の不整形性が考慮されていない。一方、兵庫県南部地震の際に極めて重要な問題とされた、深部地盤構造の2次元効果による特異な増幅¹⁾は、短周期で影響する可能性が指摘されている。また、大阪平野には上町断層帯もしくは生駒断層帯近傍において、基盤深度が急激に変化する地域がある(図1)。

そこで本研究では、大阪エリアで、地盤の2次元不整形性を考慮して短周期まで計算できる2次元FEM解析を用いた2次元増幅と従来法の1次元増幅による地震動評価を比較した。まず、入射波にリッカー波を用いて、2次元効果による増幅特性を把握した。そして、大阪エリアでの甚大な被害が懸念される上町断層帯地震を対象地震として地震動評価を行い、2次元増幅の必要性を検討した。

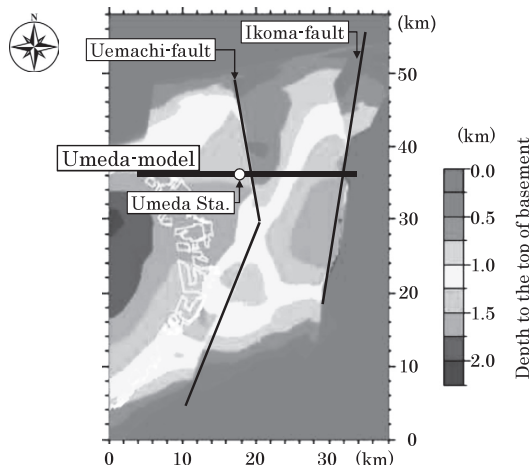


図1 大阪エリアの地震基盤の深度コンター²⁾と検討対象地盤断面の位置

2. 検討対象地域と深部地盤断面モデル

大阪エリアには深部地盤において上町断層帯および生駒断層帯による段差構造が存在する。本研究では、そのような深部地盤に不整形性が見られる地盤断面を対象として検討を行う。上町断層帯による基盤深度差が特に大きい大阪エリアの北側地域を検討対象地域とし、図1に示す太線部で切った地盤断面をモデル化し、Umeda-modelとする。上町断層帯と生駒断層帯にほぼ直交する長さ30kmの東西方向断面モデルであり、大阪の中心地である梅田駅を通る。

深部地盤データ³⁾を基に作成したUmeda-modelの概略図を図2に示す。本検討では、地震基盤から工学的基盤までを深部地盤と称し、地震基盤は $V_s=3200$ (m/s)、工学的基盤は $V_s=400$ (m/s)とし、深さ2kmまでをモデル化している。そのため、上面が工学的基盤位置である。各層の物性値を表1に示す。減衰定数 h は文献⁴⁾より、 $h=1/(2Q_0f1.0)$ で算出され

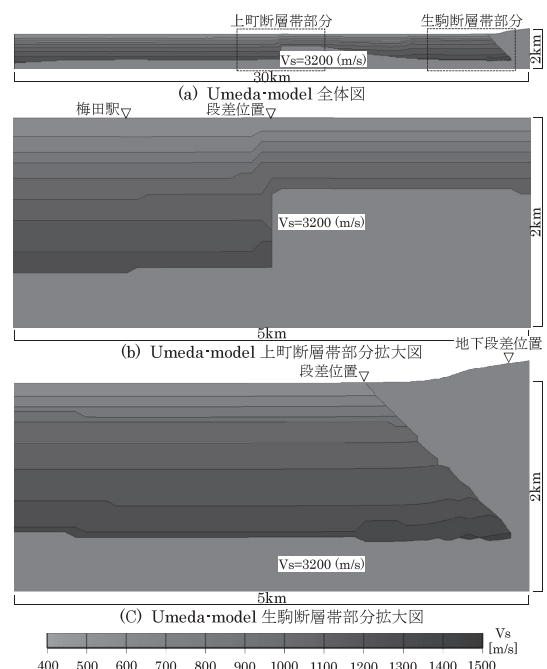


図2 深部地盤 Umeda-model の概略図

る振動数依存の値とした。さらに、2次元FEM解析を行うためにメッシュ分割を行い、各層の要素サイズは最大5Hzまでの波動伝搬が表現できるように設定した。

表1 Umeda-modelの各層の物性値

model	V_s (m/s)	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	3200
Umeda	V_p (m/s)	1600	1800	1900	2000	2100	2300	2400	2600	2800	2900	5400
	density (t/m^3)	1.8	1.9	2.0	2.0	2.0	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.7
	Q_0	33		40		53		67		100		

3. リッカー波による基本的な検討

3.1 入射波

本節の検討で用いる入射波は、リッカー波である。リッカー波は周波数成分が中心振動数 f_p の近傍に集中した波であり、本検討では $f_p=0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0$ (Hz) の6波を入射波として用いた。なお、最大加速度は $300 \text{ (cm/s}^2\text{)}$ になるように基準化した。波形の一例として図3に $f_p=1.0$ (Hz) の加速度波形を示す。

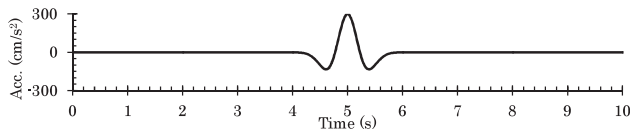


図3 リッカー波の波形 ($f_p=1.0\text{Hz}$)

3.2 解析手法

(1) 2次元FEM解析

解析全領域を線形とし、解析モデルの側面はエネルギー伝達境界、底面は粘性境界とし、周波数応答解析により伝達関数の算出を行う。本検討では、リッカー波をUmeda-modelの地震基盤の底面に一様鉛直入射するSV波解析(面内水平成分)とSH波解析(面外水平成分)の2パターンに対して、0~5Hzの周波数領域で応答計算する。応答算出地点は工学的基盤位置の100m間隔の301地点である。

(2) 1次元解析

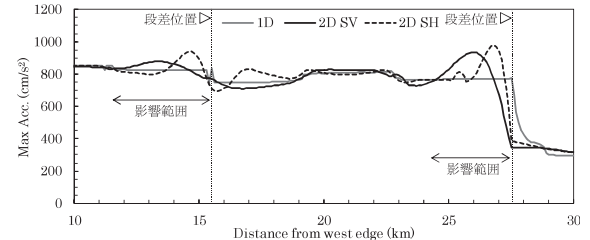
1次元重複反射理論に基づき算出した深部地盤の伝達関数を入射波のフーリエ変換と掛け合わせ、フーリエ逆変換することで工学的基盤波を算出する。2次元FEM解析と同様、伝達関数はモデル下端で地震基盤中の深度2km位置に対する工学的基盤位置の伝達関

数であり、解析全領域を線形として計算する。地盤モデルは、2次元FEM解析の応答算出地点の301地点で、直下の2次元モデルの層構造を抽出して作成した。301地点の地盤モデルすべてで、6波のリッカー波を入射して工学的基盤波を算出する。

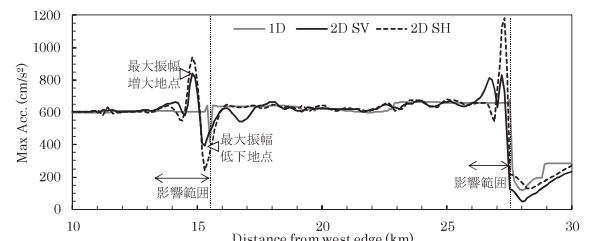
3.3 解析結果の比較と考察

(1) 最大加速度分布の比較

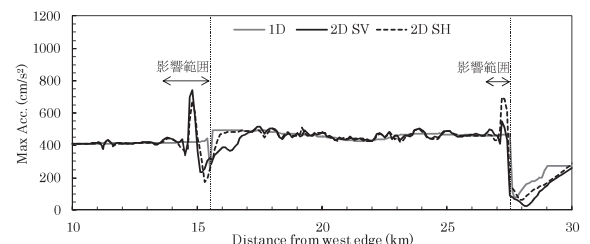
図4に、 $f_p = 0.2, 1.0, 2.0$ (Hz) のリッカー波を入射した場合の工学的基盤位置の最大加速度分布の比較を示す。各図とも横軸は断面モデルの西端からの距離であり、断面モデルの段差位置は黒色の点線で示している。段差近傍で、1次元解析と2次元FEM解析に差が見られる。特に、段差位置から西側に約1~2kmの地点で、2次元FEM解析の場合は局所的に最大振幅が増大している。また逆に、段差近傍で最大振幅が低下している地点もある。図4(b)では段差から西側700mで最大振幅増大地点、西側300mで最大振幅低下地点が現れている。また、2次元FEM解析のSV波解析とSH波解析にも差が見られる。



(a) Input Ricker wavelet $f_p=0.2\text{(Hz)}$



(b) Input Ricker wavelet $f_p=1.0\text{(Hz)}$



(c) Input Ricker wavelet $f_p=2.0\text{(Hz)}$

図4 最大加速度分布の比較

(2) 段差構造の影響範囲と局所振幅増大率

図 5 (a) に、段差構造により 2 次元 FEM 解析と 1 次元解析で最大振幅に差が生じている範囲を示す。低振動数の波ほど段差構造の影響範囲は広がることわがかる。また、影響範囲は上町段差と生駒段差でも差があり、上町段差の方が大きい。

図 5 (b) には、局所的な最大振幅増大地点において 1 次元解析に対する 2 次元 FEM 解析の最大振幅の増大率を示す。上町段差と生駒段差では局所振幅増大率が大きくなる周期帯が異なることわがかる。上町段差では $f_p=1.5 \sim 3.0$ (Hz)、生駒段差では $f_p=0.5 \sim 1.0$ (Hz) で特に大きく、上町段差の方が生駒段差よりも増大率が大きくなる周期帯が短周期側である。両段差とも、最大で 1 次元解析の約 1.8 倍も 2 次元解析の最大振幅は大きくなる。

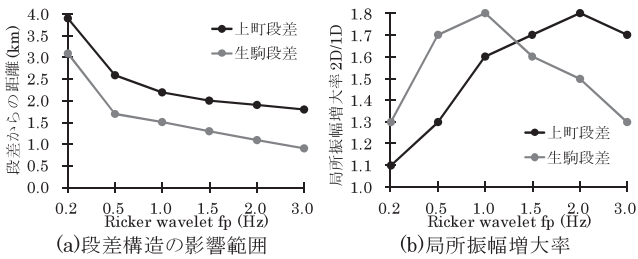


図 5 段差構造の影響範囲と局所振幅増大率

(3) 散乱波の抽出

2 次元 FEM 解析波から 1 次元解析波を引くことで、地盤の不整形性により生じる散乱波を抽出する。図 6 に $f_p=1.0$ (Hz) のリック波の SV 波入射時の上町段差近傍地点の散乱波を示す。図の縦軸は段差からの距離を表して、段差西側を+、段差東側を-とし、段差位置から東西に 1.5km までの散乱波を示している。段差位置で散乱波が生成され、段差を境に東西で散乱波の位相が反転している。

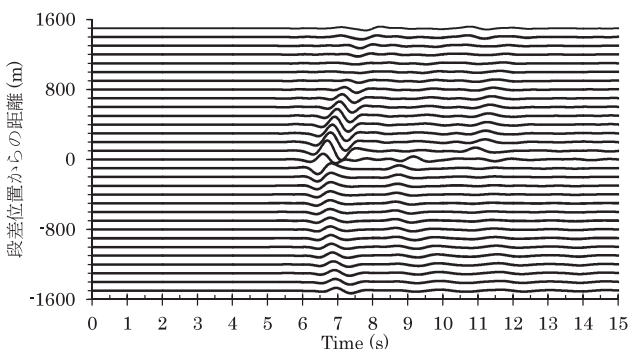


図 6 上町段差近傍の散乱波 ($f_p=1.0\text{Hz}$)

(4) 散乱波と鉛直実体波の位相の干渉

図 7 に $f_p = 1.0$ (Hz) のリック波の SV 波入射時の上町断層近傍地点の散乱波と 1 次元解析波の比較を示す。段差から西側 700m 地点は 2 次元 FEM 解析の局所的な最大振幅増大地点で、段差から西側 300m 地点は最大振幅低下地点である。図 7 から西側 700m 地点では 1 次元解析波と散乱波の位相が揃い、西側 300m 地点では位相がずれていることわがかる。したがって、局所的な最大振幅の増大は、鉛直実体波と散乱波の位相が揃うことで発生すると考えられる。

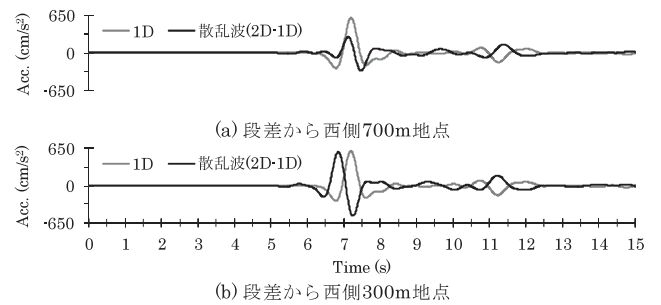


図 7 上町段差近傍地点の散乱波と 1D 解析波の比較

4. 上町断層帯地震の地震動評価

4.1 検討手法

検討手法では、工学的基盤波を図 8 に示す手順で算出する。検討手法は従来法では考慮できない深部地盤の 2 次元不整形性を考慮できる。今回用いた 2 次元 FEM 解析は一様入射であるが、基盤波の空間的な変動を考慮するため以下の工夫をした。観測点ごとに入射波を変え、その入射波はその観測点の直下の地震基盤位置で統計的グリーン関数法により求めた波形とした。また、地震応答の水平方向の連続性を確保するために入射波の位相はすべて同じとする。

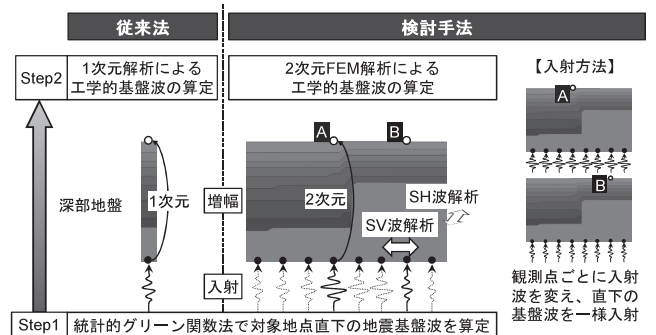


図 8 検討手法と従来法の違い

4.2 統計的グリーン関数法による地震基盤波の算出

本検討での断層パラメータは、中央防災会議の強震動評価で用いられたモデル⁵⁾を基に設定した。図9に断層モデルを、表2に断層パラメータを示す。統計的グリーン関数法により、Umeda-model 下端の100m 間隔の301 地点の地震基盤波を算出した。

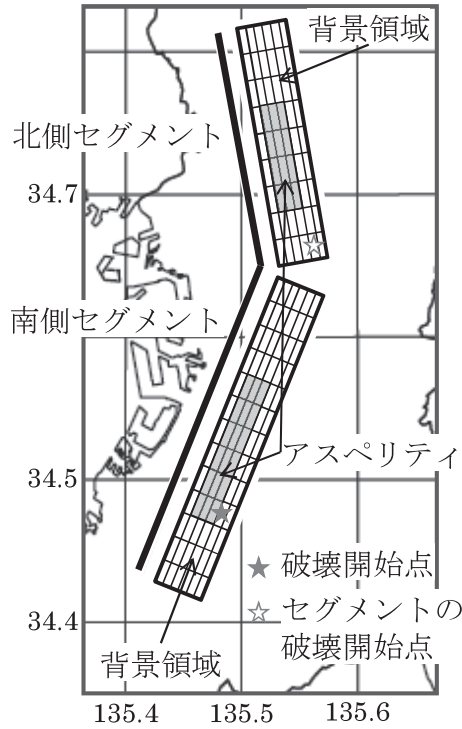


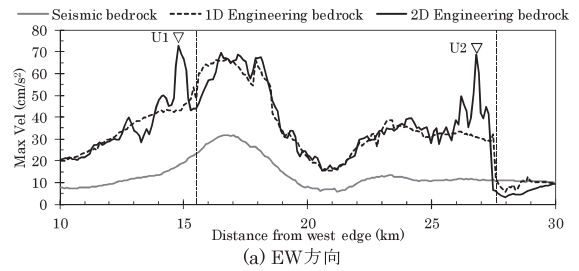
図9 断層モデル

表2 断層パラメータ

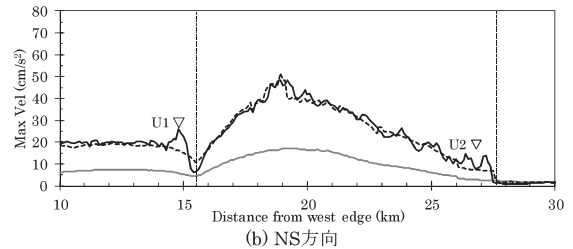
データ内容		北側	南側
断層基準点	東経 (度)	135.5340	135.4270
	北緯 (度)	34.6480	34.4260
	深さ (km)	4.0	4.0
要素地震 (震源)	東経 (度)	135.5370	135.5000
	北緯 (度)	34.7350	34.5270
	深さ (km)	9.5	9.5
破壊開始点	東経 (度)	135.564	135.489
	北緯 (度)	34.662	34.472
	深さ (km)	12.25	13.17
断層長さ (km)		18.76	25.82
幅 (km)		11.71	11.71
strike (度)		350	22
dip (度)		70	70
地震モーメント (Nm)	アスペリティ	1.37 E+19	1.96 E+19
	背景領域	2.21 E+19	2.29 E+19
重ね合わせ数	長さ方向	9	13
	幅方向	6	6
	時間	4	4
せん断波速度 (km/s)		3.5	3.5
破壊伝播速度 (km/s)		2.5	2.5
ライズタイム (sec)	アスペリティ	1.17	1.17
	背景領域	2.34	2.34

4.3 深部地盤の応答評価

上町断層帯地震の地震基盤波を入射波として、Umeda-model で1次元解析と2次元FEM解析を行った。図10に工学的基盤位置の最大速度分布を示す。EW方向の2次元FEM解析 (SV波解析) ではU1地点とU2地点で最大速度が局所的に増大している。U1地点で2次元FEM解析の最大振幅は1次元解析の1.7倍、U2地点では2.2倍になる。一方、NS方向 (SH波解析) はEW方向ほど局所的な最大振幅の増大が顕著ではない。U1地点のEW方向の工学的基盤波 (速度波形) と、擬似速度応答スペクトル (減衰定数5%) を図11と図12にそれぞれ示す。図11の速度波形では、2次元FEM解析波は主要動の多くのピークで1次元解析波よりも振幅が大きい。図12から2次元FEM解析と1次元解析の応答差は周期0.4~0.7 (s) で特に大きく、最大で2倍程度にもなる。また、告示スペクトル (レベル2) も大きく上回っている。



(a) EW方向



(b) NS方向

図10 工学的基盤位置の最大速度分布

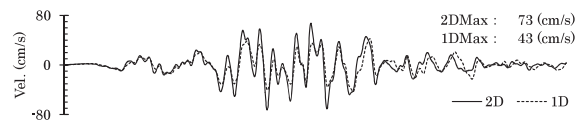


図11 U1地点の工学的基盤波 (速度波形)

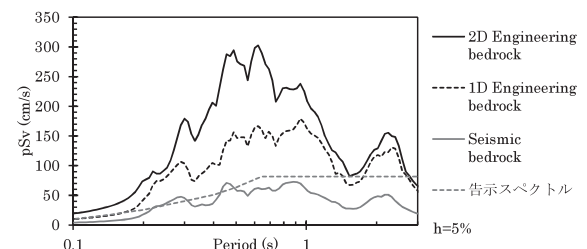


図12 U1地点の擬似速度応答スペクトル

5. 結論

本研究では、1次元モデルで評価されることが多い深部地盤の増幅率を2次元モデルで評価した。例として梅田駅を通り、上町断層帯と生駒断層帯による段差構造を有する深部地盤で1次元解析と2次元解析を比較した。以下に本検討で得られた結果を示す。

1) リッカー波による基本的な検討

- ・段差構造で発生する散乱波と鉛直実体波の干渉により、段差西側で振幅が局所的に増大した。
- ・段差構造の影響する範囲は低振動数ほど広く、卓越振動数 0.2Hz の波では段差から 4km の範囲まで影響が及ぶ。
- ・2次元増幅の1次元増幅に対する増大率は最大 1.8 になり、上町段差の方が生駒段差よりも増大率が大きくなる周期帯が短周期側であった。

2) 上町断層帯地震の地震動評価

- ・2次元解析では、段差近傍地点で局所的に最大振幅が増大し、上町段差で 1.7 倍、生駒段差で 2.2 倍も 1次元解析よりも大きくなった。
- 上町段差による局所的な増幅では周期 0.4 ~ 0.7 (s) 成分が特に増幅した。

<参考文献>

- 1) 永野正行, 他: 兵庫県南部地震時の神戸市内における基盤地震動および地盤増幅特性, 日本建築学会構造系論文集, No.511, pp.77- 84, 1998.9
- 2) 堀川晴央, 他: 大阪平野の3次元地盤構造モデルの作成, 活断層・古地震研究報告, No.2, pp.291-324, 2002
- 3) 独立行政法人 産業技術総合研究所, 地質調査総合センター: 大阪堆積盆地3次元地盤構造モデル CD-ROM, 2004.4
- 4) 永野正行, 他: 深部地盤の地中段差近傍における地震動増幅特性, 日本建築学会構造系論文集, No.643, pp.1585-1594, 2009.9
- 5) 中央防災会議: 東南海, 南海地震等に関する専門調査会(第26回), 中部圏・近畿圏の内陸地震の震度分布等について, 資料(平成18年12月7日), 2006



株式会社大林組 本社設計本部
 部長室企画課(本務)、東京本店
 エフビコ八王子工事事務所(兼務)
 現在、東京都八王子市内の建設現場で一年間の現場研修中で施工管理業務に従事。5月から構造設計部に本配属予定。

(建築 平成 23 年卒 25 年前期)

<謝辞>

本研究を進めるにあたり、ご指導頂いた宮本裕司教授、吉村智昭准教授に心から感謝致します。また、ご協力頂いた宮本研究室へ心より御礼申し上げます。