

S V波入力による沖積谷地形の地震動増幅特性について

吉 田 隆 治

要 旨

構造物の耐震安全性を検討する場合、地震力をどう評価するかは重要な項目のひとつである。地震動の特性に強く影響を与える要素のひとつに注目地点の地盤条件が挙げられるが、1995年兵庫県南部地震では地盤の不整形性による大きな揺れが注目を集めた。ここでは、不整形性地盤である沖積谷地形についてSV波入力に対する地震動増幅特性を2次元有限要素法を用いた線形地震応答解析により検討した。その結果、

- ① 水平方向の応答加速度は沖積谷端部から谷深さの約3倍のところで大きな応答を示す。
 - ② 鉛直方向の応答加速度は沖積谷端部から谷深さの約1倍のところで大きな応答を示し、その値は水平成分と同程度の応答を示す場合がある。
 - ③ 地震動の増幅は水平成層地盤としたときの1次固有周期より短周期側の周期領域で生じる。
- ことが示され、沖積谷地形での地震力評価においてはその不整形性の影響を十分検討する必要があることがわかった。

キーワード 地震動増幅特性／不整形地盤／沖積谷地形／S V波／地震応答解析

目 次

- | | |
|-----------------|-------------|
| 1. はじめに | 4. 解析結果のまとめ |
| 2. 対象地形と地盤モデル | 5. おわりに |
| 3. 沖積谷地形の地震応答解析 | |

STUDY ON SITE EFFECT OF BURIED-VALLEY ON EARTHQUAKE GROUND MOTION DUE TO INPUT SV WAVE

Takaharu YOSHIDA

Synopsis:

In this paper, for the purpose of understanding site effects of a buried-valley on an earthquake ground motion, two-dimensional dynamic linear analyses for input SV wave were carried out. From the analyses for some idealized buried-valleys, the following results were obtained.

- 1) The largest horizontal response acceleration on the surface of the valley was appeared at a distance of about three times as long as its depth from its edge.
- 2) The vertical one was appeared at a distance of about as long as its depth from its edge.
- 3) Site effects can not ignored for seismic design of an engineering structure which is intend to construct on a buried-valley.

1. はじめに

構造物の耐震安全性を検討する場合、地震力をどう評価するかは重要な項目のひとつである。地震動の性質は一般に震源、伝播経路、および注目地点の地盤条件に影響されると考えられており、過去の地震被害事例から地盤条件との関係が古くから注目されてきた。

現行の設計基準ではこの地盤条件は地盤種別として大きくくりで取り入れられているが、地盤の不整形性までは考慮されていない。表層地盤の影響を動的解析によって評価する場合でも、地盤を水平成層地盤と仮定した1次元解析が行われることが多く、2次元、3次元解析によって地震動を評価することは特殊な重要構造物を除いて行われることはない。しかし、過去の地震からは表層地盤の不整形性が被害を大きくしたとする報告もあり、また1995年兵庫県南部地震では海岸線に沿った狭い帯状の地域で大きな被害を生じたことは記憶に新しい。

表層地盤の不整形性が地震動に与える影響に関する研究はこれまでもさかに行われており、最近では設計をにらんだ簡易評価式の提案^{1)・2)}もなされている。特に1995年兵庫県南部地震以降、設計基準への反映を考えた研究^{3)・4)}が進められている。

ここでは以上のことを踏まえ、表層地盤の不整形性と地震動増幅特性の関係を把握し、入力地震動評価の一助とすることを目的に数値解析的に検討を行った。対象地形には沖積谷地形（ここでは微地形を考える）を取り上げ、SV波入射に対する地震動増幅特性について検討を行った。以下、数値解析的検討から得られた結果について報告する。

2. 対象地形と地盤モデル

不整形地盤は多種多様であるが、大きく地表面地形の不整形と地層構造の不整形に分けることができる。地表面地形の不整形には崖地形、台地地形などがあり、地層

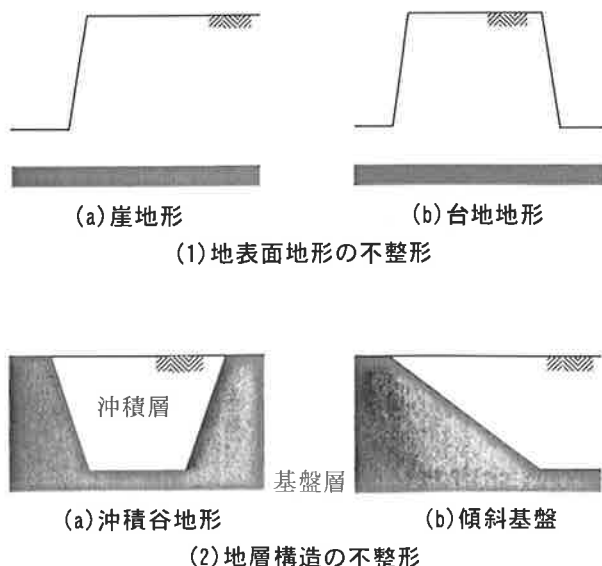


図2.1 不整形地盤の模式図

構造の不整形には傾斜基盤や沖積谷地形などがある。これらを模式的に表せば図2.1のようになる。これら不整形地盤のうちここでは沖積谷地形を対象としてその地震動増幅特性を検討する。また、地層構造は均質な沖積層と基盤層（工学的基盤）からなる図2.1(2)(a)のような非常に単純化した構造を想定する。

3. 沖積谷地形の地震応答解析

3.1 解析条件

解析は2次元有限要素法を用いた線形地震応答解析とし、入力地震動はSV波とする。沖積谷地形の増幅特性は沖積谷中央部と同じ地層構造を有する水平成層地盤の応答との比較により検討する。解析条件を以下に示す。

(1) 解析モデル

図3.1に解析モデルの模式図を示す。解析モデルは深さ方向に75mの領域をとり、側方境界にはエネルギー伝達境界、底面境界には粘性境界を設けて波動の逸散を考慮したモデルとする。有限要素の大きさは解析対象振動数の上限を10Hzに設定し、沖積層では2.5m以下、基盤層では7.5m以下を基本とする。谷幅は50m、100m、200mの3種類、側方の基盤傾斜角度は15度、

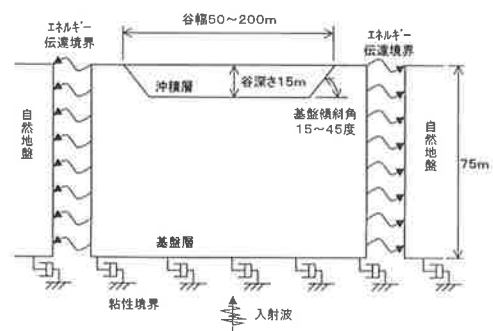


図3.1 解析モデル模式図

表3.1 解析モデルの諸元

解析モデル	谷幅 (m)			基盤傾斜角 (度)			谷深さ (m)
	50	100	200	15	30	45	
I	—	—	○	—	—	○	○
II	—	○	—	—	—	○	○
III	○	—	—	—	—	○	○
IV	—	—	○	—	○	—	○
V	—	—	○	○	—	—	○

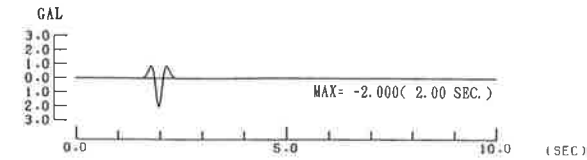
表3.2 解析に用いた地盤物性値

	沖積層	基盤層
単位体積重量 (t/m ³)	1.6	1.8
せん断波速度 (m/s)	130	400
減衰定数 (%)	5	2
ポアソン比	0.48	0.4

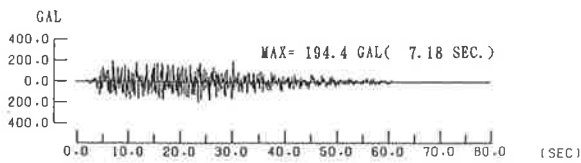
30 度、45 度の 3 種類を考え、谷深さと地盤物性値（沖積層および基盤層）は標準的な値に固定する。表 3.1 に解析モデルの諸元を、表 3.2 に地盤物性値を示す。

(2) 入力地震動

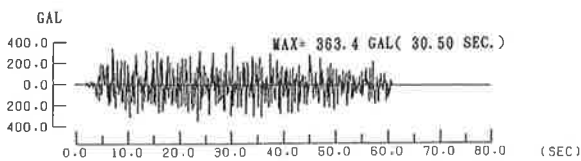
入力地震動は水平成分のみとし、S V 波を鉛直下方から入射する。地震波には基本的な応答性状を把握するための Ricker-Wavelet 波と実際の挙動を把握するための模擬地震波の 2 種類を考え、これらを解析モデル側の自然地盤表面で規定する。図 3.2 に自然地盤表面における地震動波形を示す。Ricker-Wavelet 波は沖積層の厚さ



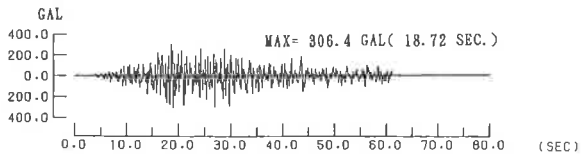
(1) Ricker-Wavelet 波



(a) 地震波 A



(b) 地震波 B



(c) 地震波 C

(2) 模擬地震波

図 3.2 自然地盤の表面で規定した加速度波形⁷⁾

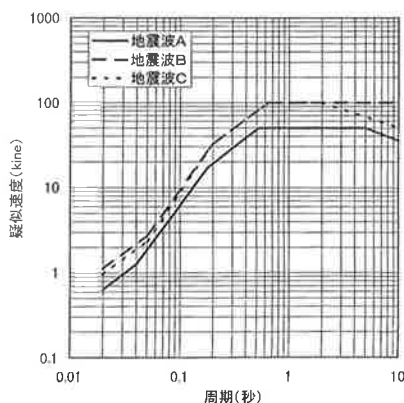


図 3.3 模擬地震波作成に用いた疑似速度応答スペクトル（減衰 5 %）^{5), 6)}

15m とせん断波速度 130m/s から求めた沖積地盤の固有振動数 2.17Hz を中心振動数とする波とする。模擬地震波は図 3.3 に示した疑似速度応答スペクトルを目標スペクトル^{5), 6)}とした 3 波とする。

(3) 解析ケース

表 3.1 の解析モデルおよび図 3.2 の入力地震動の組み合わせにより、表 3.3 の 20 ケースについて地震応答解析を行う。

表 3.3 解析ケース

解 析 ケ-ス	解 析 モ デ ル					入 力 地 震 動			
						Ricker -Wavelet	模 擬 地 震 波		
	I	II	III	IV	V			A	B
1	○	—	—	—	—	○	—	—	—
2	—	○	—	—	—	○	—	—	—
3	—	—	○	—	—	○	—	—	—
4	—	—	—	○	—	○	—	—	—
5	—	—	—	—	○	○	—	—	—
6	○	—	—	—	—	—	○	—	—
7	—	○	—	—	—	—	○	—	—
8	—	—	○	—	—	—	○	—	—
9	—	—	—	○	—	—	○	—	—
10	—	—	—	—	○	—	○	—	—
11	○	—	—	—	—	—	—	○	—
12	—	○	—	—	—	—	—	○	—
13	—	—	○	—	—	—	—	○	—
14	—	—	—	○	—	—	—	○	—
15	—	—	—	—	○	—	—	○	—
16	○	—	—	—	—	—	—	—	○
17	—	○	—	—	—	—	—	—	○
18	—	—	○	—	—	—	—	—	○
19	—	—	—	○	—	—	—	—	○
20	—	—	—	—	○	—	—	—	○

3.2 解析結果

3.2.1 Ricker-Wavelet 波による検討

沖積谷地形の基本的な応答性状を Ricker-Wavelet 波を用いて検討した結果を以下に示す。

(1) 応答加速度波形および最大応答加速度比

a) 水平成分

図 3.4 に沖積谷地表面の応答加速度（水平成分）の時刻歴波形を沖積谷端部から中央部までを 5m 間隔で示した。また、比較のため、沖積谷中央部と同じ地層構造を有する水平成層地盤の応答値も最下段に示した。全体的に水平成層地盤の応答に比べて継続時間が長く、3 秒以降に後続波が見られる。谷幅 200m、基盤傾斜角 45 度のケース 1 では後続波の現れ方は場所によって異なり、

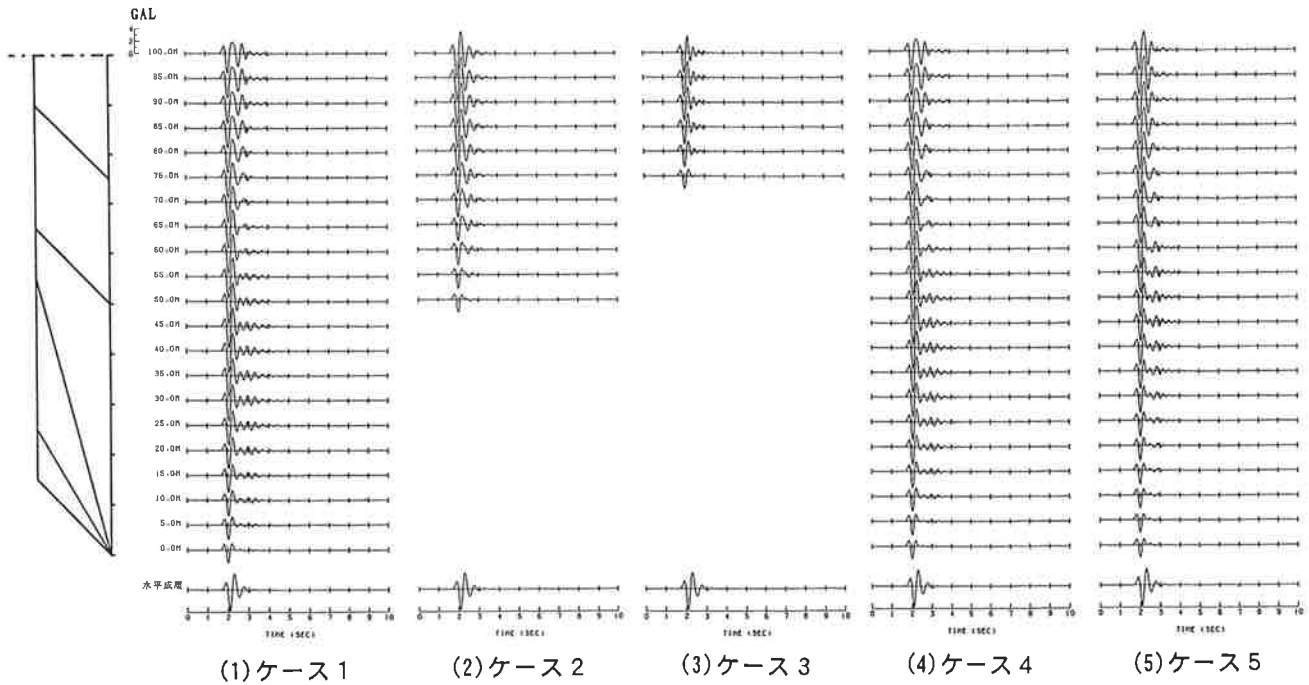


図3.4 沖積谷地表面の応答加速度波形（水平成分）

谷端部から15m～60mでは比較的振幅が大きく、70m～80mの位置では小さい。谷幅100mのケース2では後続波の振幅はケース1に比べ小さくなり、空間方向の現れ方も谷中央部ほど振幅が大きくなる傾向に変わる。谷幅50mのケース3では3秒以降の後続波はほとんど見られなくなる。基盤傾斜角の影響はあまり見られず、ケース4（基盤傾斜角30度）、およびケース5（基盤傾斜角15度）とケース1には谷幅を変化させた時ほど大きな違いは見られない。

図3.5に谷中央部の地層構造を有する水平成層地盤の応答値で基準化した最大応答加速度比の地表面分布を示す。沖積谷底部が水平な部分でも最大加速度比には場所による違いが現れ、不整形性の影響を受けていることがわかる。ケース1では谷端部から40m～50m（谷深さの約3倍）のところで最大値（1.08）を示し、谷中央部に向けて再び小さくなるふた山型の分布を示す。谷中央部では水平成層地盤の応答を下回っている。谷幅100mのケース2ではケース1で見られた左右の山が重なり、谷中央部に最大値を示すひと山型の分布に変化する。最大値も1.15とケース1より大きい。しかし、谷幅50mのケース3ではひと山型の分布ではあるが、左右の基盤傾斜部の拘束効果が強く現れ、その最大値は逆

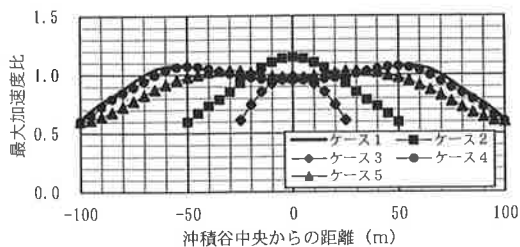


図3.5 水平成層地盤に対する最大加速度比の分布（水平成分）

に0.98と減少する。基盤傾斜角の影響はケース5（基盤傾斜角15度）で現れる（基盤傾斜角30度のケース4はケース1とほとんど同じ分布となる）。分布はふた山型となるものの、最大値の発生位置が谷中央部に移動し、その最大値（1.04）もケース1より幾らか小さい。

b) 鉛直成分

図3.6にケース1（谷幅200m、基盤傾斜角45度）の

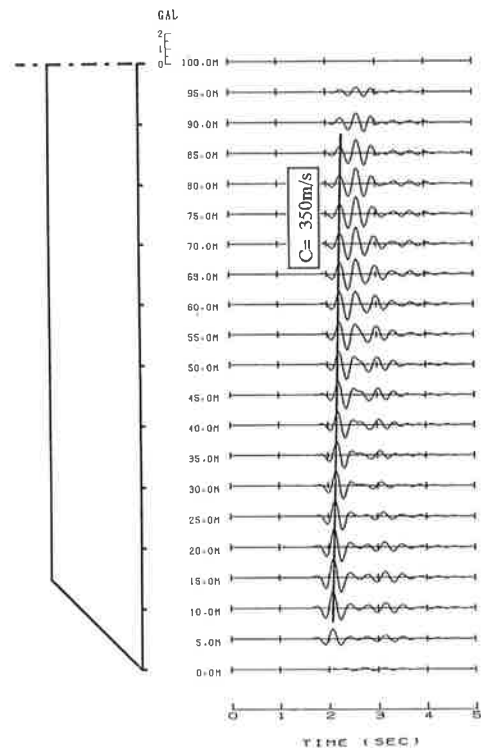


図3.6 応答加速度波形（ケース1：鉛直成分）

沖積谷地表面における応答加速度の鉛直成分を示す。水平動入力に対して水平成層地盤では鉛直成分は励起されないが、沖積谷地形によって鉛直動が発生している。また、図 3.4 にははっきり現れていなかったが、波形前半部分に沖積谷端部から中央部に向かって約 350m/s の速さで伝播する波が見て取れる。

図 3.7 に沖積谷中央部の地層構造を有する水平成層地盤を仮定して求めた Rayleigh 波の分散曲線を示す。図には Ricker-Wavelet 波の中心振動数 2.17Hz に対して上記の伝播速度 350m/s を併記したが、ほぼ Rayleigh 波の位相速度に一致している。すなわち、水平方向に伝播する波は Rayleigh 波と見なすことができ、これが沖積谷地形の応答を複雑なものとしている。

図 3.8 に水平成分に対する鉛直成分の最大加速度比の地表面分布（ケース 1～5）を示す。谷幅、基盤傾斜角度で分布の形状は異なるが、基盤傾斜角度の比較的小さいケース 5 を除いて、谷端部から 10m～20m（谷深さの約 1 倍）のところで最大値を示している。また、鉛直

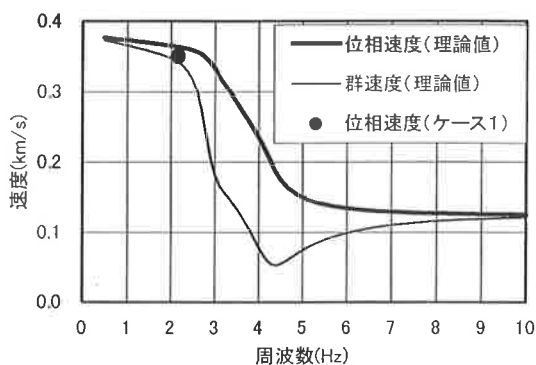


図3.7 沖積谷中央部の地層構造を有する水平成層地盤の Rayleigh 波の分散曲線

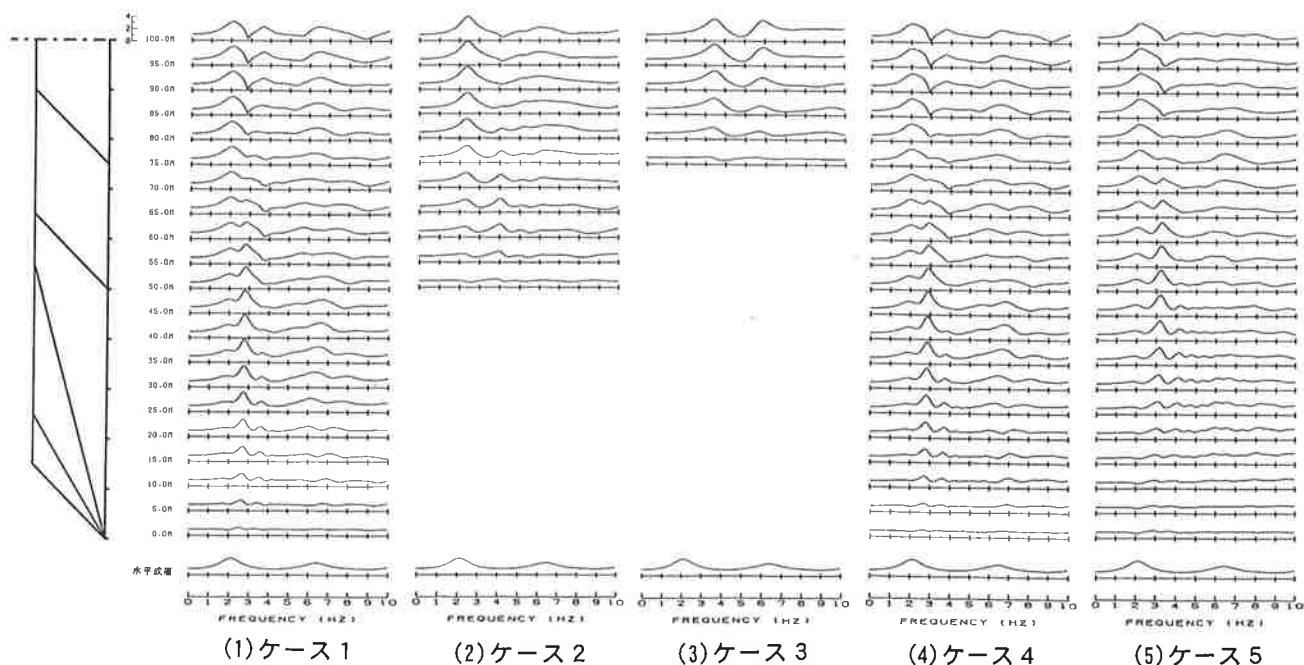


図3.9 沖積谷地表面の増幅関数（水平成分）

動は比較的大きく、その最大値は水平成分の約 0.5 倍と無視することのできない大きさであることがわかる。

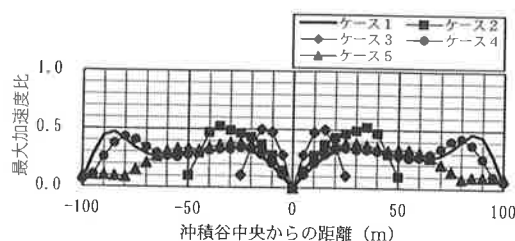


図3.8 水平成分に対する鉛直成分の最大加速度比の地表面分布

(2) 増幅関数

図 3.9 に入射波に対する沖積谷地表面の増幅関数（水平成分）を谷端部から中央部までを 5m 間隔で示した。また、比較のため、沖積谷中央部と同じ地層構造を有する水平成層地盤の増幅関数も最下段に示した。増幅関数は場所によってその形状が大きく異なり、水平成層地盤に対応する卓越振動数の他に、水平成層地盤では説明のできない卓越振動数が現れる。例えば、谷幅 200m、基盤傾斜角 45 度のケース 1 では 2.2Hz、2.8Hz、3.6Hz、6.5Hz に卓越する振動数成分が見られ、水平成層地盤では説明のできない 2.8Hz、3.6Hz の振動数成分は場所によって山となったり、谷となったりする特徴を有する。増幅関数に与える影響は基盤傾斜角より谷幅の変化に対して大きく現れている。谷幅 50m のケース 3 では水平成層地盤の 1 次固有振動数に対応する卓越成分はなくなり、また水平成層地盤では説明のできない 3.5Hz の振動数成分が空間方向に山となったり、谷となったりする傾向も見られなくなる。

谷幅や基盤傾斜角と増幅関数には明瞭な関係は見いだ

せないが、どのケースも水平成層地盤の1次固有振動数より高振動数側で増幅関数が複雑に変化していることがわかる。すなわち、不整形性の影響は振動数領域では水平成層地盤の1次固有振動数より高振動数側で現われると言える。

3.2.2 模擬地震波による検討

沖積谷地形の実地震動に対する応答性状を模擬地震波を用いて検討した結果を以下に示す。

(1) 最大応答加速度比

a) 水平成分

沖積谷中央部と同じ地層構造を有する水平成層地盤の最大応答加速度で基準化した最大応答加速度比で模擬地震波入力に対する応答特性を検討する。

図3.10に最も大きな加速度比を与えた解析モデルⅠ～Ⅴに地震波Aを入力したとき(ケース6～10)の最大応答加速度比の地表面分布を示した。この地表面分布には小さな凹凸が見られるが、基本的にはRicker-Wavelet波の場合と同じ分布形状を示している。しかし、その値はRicker-Wavelet波の場合に比べて大きく、ケース7(谷幅100m, 基盤傾斜角45度)では沖積谷中央部で水平成層地盤の応答値の約1.4倍(Ricker-Wavelet波では1.15倍)にも達している。これはRicker-Wavelet波に比べて地震動の継続時間が長いことや幅広い振動数成分を含んでいることが影響したためと考えられる。

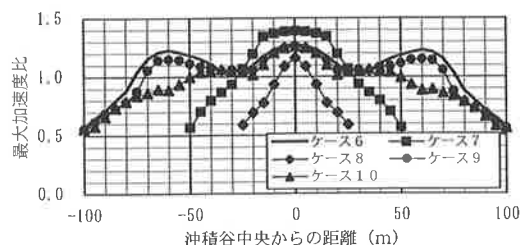


図3.10 水平成層地盤に対する最大加速度比の分布(水平成分)

b) 鉛直成分

図3.11には解析ケース6～10の水平成分に対する鉛直成分の最大応答加速度比の地表面分布を示した。この分布もRicker-Wavelet波の場合と基本的に同じ分布形状を示すが、その値は全体的に大きい。特に谷幅50m

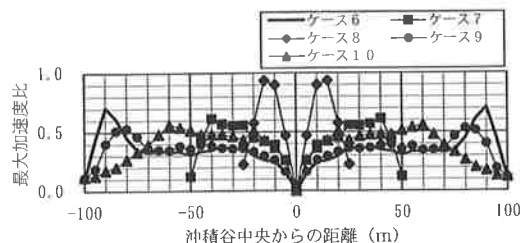


図3.11 水平成分に対する鉛直成分の最大加速度比の地表面分布

のケース8では最大値が0.95にもなり、水平成分と同程度の加速度が生じている。

前にも述べたが、地盤の不整形性によって生じる鉛直成分は解析結果からは無視できる大きさではない。今後、地震観測などで検証するとともに、設計にどのように取り入れてゆくかを検討する必要がある。

(2) 疑似速度応答スペクトルおよび疑似速度応答スペクトル比

文献5)の設計用入力地震動作手法技術指針(案)では地盤の不整形性の影響を設計用応答スペクトル(減衰5%の疑似速度応答スペクトルで規定)に対する補正スペクトルとして与えている。ここでは、この補正スペクトルを念頭に置き、疑似速度応答スペクトルおよび水平成層地盤に対するスペクトル比で模擬地震波入力に対する沖積谷地形の応答特性を検討する。

図3.12に解析ケース6～10の沖積谷地表面の水平動に関する疑似速度応答スペクトル(減衰定数5%)を示した。同図は谷端部から中央部までを5m間隔で重ね書きで示し、また比較のため沖積谷中央部と同じ地層構造を有する水平成層地盤のスペクトルも示した。沖積谷地表面のスペクトルと水平成層地盤のそれを比較すると、沖積谷地表面のスペクトルには水平成層地盤の1次固有周期(0.46秒)付近にも卓越する成分が見られ、基本的には水平成層地盤の応答に不整形性による影響が2次的に加わった応答であることがわかる。しかし、谷幅50mのケース8では、Ricker-Wavelet波の検討でも見られたように、水平成層地盤の1次固有周期に対応する周期成分の卓越は見られず、水平成層地盤の応答とは基本的に異なった応答を示している。すなわち、谷幅の狭いケース8では第1次近似として水平成層地盤を仮定することができないと言える。

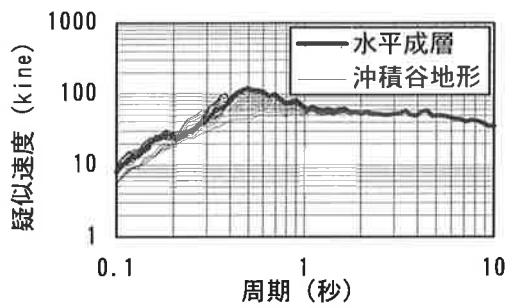
図3.13に図3.12の疑似速度応答スペクトルを水平成層地盤のそれで基準化した疑似速度応答スペクトル比を示す。これを見ると、不整形性による増幅は水平成層地盤の1次固有周期よりも短周期側に現れていることが良くわかる。また、その増幅度は最大でも1.5倍程度で、単純な形状の補正スペクトルを仮定することで沖積谷地形の不整形性の影響が評価できる可能性がうかがわれる。

尚、ここでは補正スペクトルを定量的に評価するまでには至っていないが、著者が委員として参加した地震動増幅危険度評価分科会・地震動作業委員会では沖積谷地形の補正スペクトルの簡易評価式を提案している(ここでの解析結果も反映されている)。詳しくは文献7)を参照されたい。

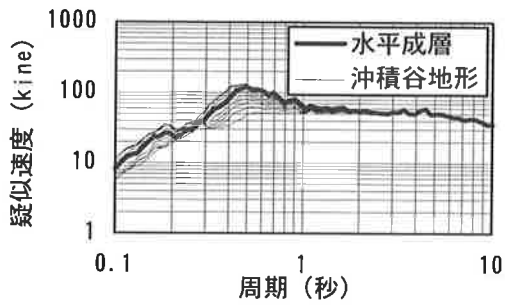
4. 解析結果のまとめ

S V波入射に対する沖積谷地形の地震動増幅特性について得られた結果を以下に示す。

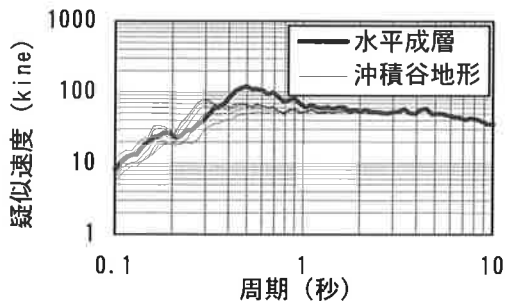
- ① 沖積谷の応答加速度は谷端部より発生した水平方



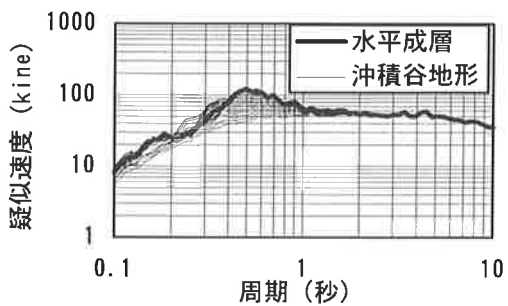
(1) ケース 6



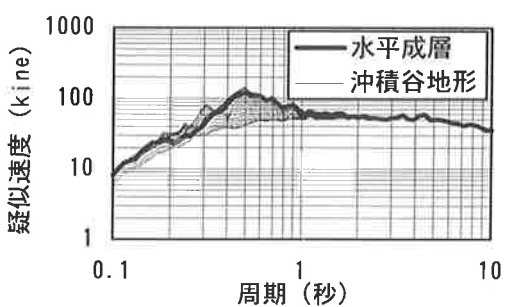
(2) ケース 7



(3) ケース 8

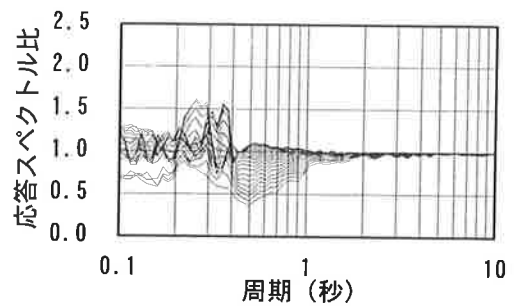


(4) ケース 9

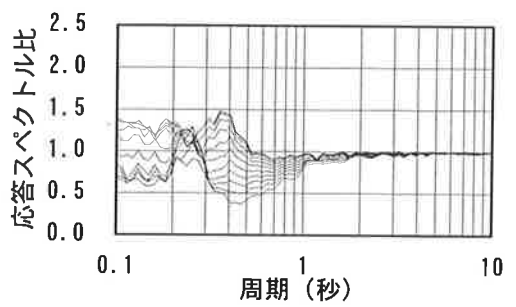


(5) ケース 10

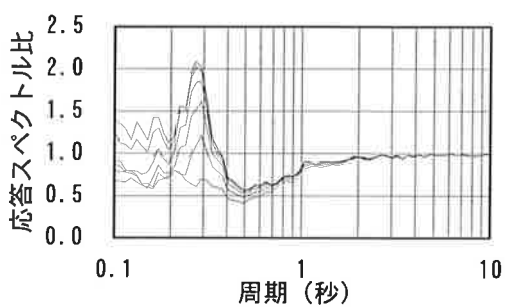
図3.12 疑似速度応答スペクトル (減衰 5 %)



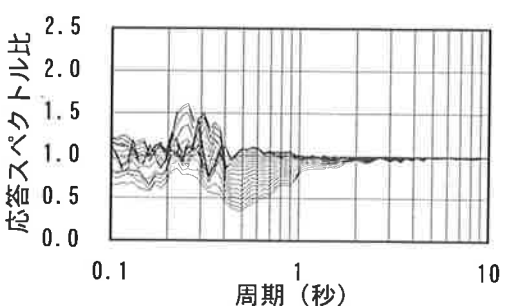
(1) ケース 6



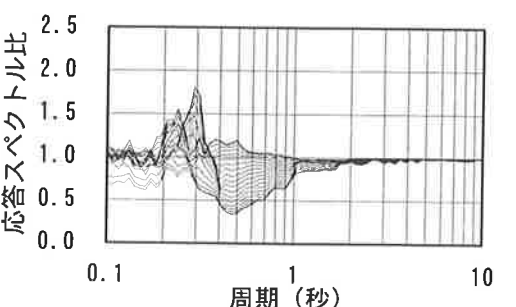
(2) ケース 7



(3) ケース 8



(4) ケース 9



(5) ケース 10

図3.13 疑似速度応答スペクトル比

向に伝播する波（Rayleigh 波）によって水平成層地盤とは異なった応答を示す。

- ② 沖積谷地表面の最大応答加速度（水平成分）の分布は谷深さの約 3 倍の所に最大値を示すふた山型の分布を示し、谷幅が狭まると二つの山が重なり、ひと山型の分布に変化する。また、その大きさは水平成層地盤の約 1.4 倍にも達するケースもある。
- ③ 沖積谷地表面の鉛直方向の応答加速度は谷深さの約 1 倍の所に最大値を示し、水平成分とはほぼ同程度の応答を示すケースもある。
- ④ 沖積谷地形の増幅特性を周期領域で見ると、水平成層地盤としての 1 次固有周期より短周期側で増幅される傾向がある。
- ⑤ 谷幅が 50m（谷深さの約 3.3 倍）まで狭まると、水平成層地盤としたときの 1 次固有周期付近の卓越成分は見られなくなり、水平成層地盤の応答とは異なった応答を示す。
- ⑥ 以上のことから、沖積谷地形における地震力評価には不整形性の影響を考慮する必要がある。特に、不整形性が原因で生じる上下動をどのように取り扱うかは今後の課題と言える。

5. おわりに

非常に単純化した解析モデルで、かつ限られた条件のもとでの解析結果ではあるが、沖積谷地形による不整形性の影響が無視できないことを示した。今後は不整形地盤での地震観測データを蓄積するとともに、観測データに基づいた検証が必要であると考ええる。

謝辞： 本研究は建設省総合技術開発プロジェクト「大都市地域における地震防災技術の開発」（平成 4～8 年度）の一環として実施された地形が地震動に及ぼす影響に関する研究（地震動増幅危険度評価分科会：主査 南

忠生東大教授）の中で行われたものである。関係各位に記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 小林孝至, 中村晋, 吉田隆治: 設計用入力地震動作成手法に関する研究 (その 6: 地形効果を考慮した地盤特性評価), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.127-128, 1993 年 9 月.
- 2) 江尻譲嗣, 後藤洋三: 基盤不整形性の影響の設計震度スペクトルの導入に関する基礎的検討, 土木学会論文集, No.501/ I -29, pp.173-182, 1994 年 10 月.
- 3) 千葉光, 本田利器, 田村敬一, 中尾吉宏: 不整形地盤における地震動増幅特性, 土木技術資料, 41-1, pp.20-25, 1999 年.
- 4) 室野剛隆, 斎藤正人, 西村昭彦: 地盤の不整形性および構造物への有効入力動の評価, 鉄道総研報告, 第 13 巻, 第 2 号, pp.23-28, 1999 年 2 月.
- 5) 建設省建築研究所, (財) 日本建築センター: 設計用入力地震動研究員会平成 3 年度報告書 設計用入力地震動作成手法技術指針 (案), p.4, 1992 年 3 月.
- 6) 臨海部構造安全委員会, (財) 日本建築防災協会: 臨海部における大規模建築群の総合的な構造安全に関する調査検討報告書 総集編, p.8, 1992 年 3 月.
- 7) 建設省建築研究所, (財) 国土開発技術研究センター: 建設省総合技術開発プロジェクト「大都市地域における地震防災技術の開発」地震動増幅危険度評価 (建築) 分科会報告書, 1997 年 3 月.
- 8) Yoshida,T., Saito,Y., Takezawa,Y. and Shimada,S. : Prediction of ground motion at Ashigara valley by one-dimensional multiple reflection theory, Proceedings of the International Symposium on The Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Vol. II, pp.165-166, 1992.